Im Schatten des Terrors



Reinhard Breuer

Der Angriff der USA auf die Taliban erst nach fast vier Wochen hat gezeigt, dass mit der „ersten Schlacht des 21. Jahrhunderts“ wirklich eine neue Epoche begonnen hat – mit einem Konflikt, bei dem Diplomatie vor dem Waffengang rangierte. Trotzdem herrscht Trauer um die rund fünftausend Opfer der grauenvollen Terroranschläge in New York und Washington vom 11. September. Von noch im Sommer heiß diskutierten Wissenschaftsthemen ist derzeit kaum mehr die Rede. Historiker, Theologen, Geistes- und Sozialwissenschaftler standen lange nicht im Rampenlicht, plötzlich waren sie gefragt. Hatten sie überhaupt etwas zu den Ursachen oder Folgen der Tragödie mitzuteilen? Bei den Experten schälten sich immerhin einige Grundaussagen heraus.

Ende der Illusionen: Bisher glaubten die meisten Menschen, dass das Land mit der größten Wirtschaftsmacht auch die stärkste Verteidigung habe. Die wachsende Fertigkeit, Atome und Gene zu manipulieren, suggerierte, dass wir allmählich zur Allmacht fortschreiten. „Wir sehen jetzt, dass wir kleine verletzliche Wesen sind.“ (Horst-Eberhard Richter, Psychoanalytiker) **Technologie:** Es bedarf keiner Raketen, um anzugreifen. Messer und Rasierklingen tun es auch, also Mittel, die dem Faustkeil näher stehen als dem Kampflaser auf einem Satelliten. „Zu viel Geld für Hightech, zu wenig für klassische Aufklärung.“ (Ch. Johnson, US-Politikwissenschaftler) **Krieg:** Im Großangriff durch Terroristen verlieren nationale Grenzen an Bedeutung; bei der „asymmetrischen Kriegsführung“ ist der Feind nicht mehr sichtbar. Krieg wird neu definiert, nicht mehr nur gegen Staaten, sondern auch gegen internationale Gruppen. Kann man noch von Krieg sprechen, wenn die Gegner sich nicht zu erkennen geben? Sie bilden ein Netzwerk statt einer geballten, lokalisierbaren Macht. Und gegen diesen Angriff aus dem Dunkeln versagen alte Rezepte. **Gegenschlag:** Wie bekämpft man einen Gegner, dessen vielleicht 3000 Mitglieder auf etwa fünfzig Länder verteilt sind? In einem Netz werden die Kommandowege schwer aufzuspüren sein, genauso wenig wie die Verantwortlichen. Die USA ziehen in eine andere Art von Krieg, der längst hinter den Kulissen läuft: Gegen die Terroristen kämpfen diesmal Geheimdienste, Politiker, Finanzexperten zugleich. **Wirtschaft:** Für die Vereinigten Staaten erwarten Experten für die nächsten zwei Jahre einen Wirtschaftsrückgang um drei Prozent – eine handfeste Rezession.



DPA

New York, 11. September 2001

Terroristen: Die Urheber und Täter der tödlichen Attacken vom 11. September passen nicht mehr ins Klischee altmodischer Glaubenskrieger. Hier agierten Spezialisten, ausgebildet in Deutschland oder den USA, aus Ländern stammend, die selbst Verbündete der Vereinigten Staaten sind. Diese Terroristen zeigen sich perfekt organisiert, finanzkräftig und logistikstark. **Wirkung:** Die Terroristen wollen nicht unsere Standfestigkeit ins Wanken bringen, wie Bush sagte, oder uns gar zum Islam bekehren. Sie wollten das World Trade Center zerstören und so die Verwundbarkeit der USA demonstrieren. **Zukunft:** Die terroristische Bedrohung wird nicht auszurotten sein. Sie wird weiter wachsen – mit oder ohne Osama bin Laden. Der Publizist Hendryk M. Broder: „Die eskalative Logik schreit nach Fortsetzung.“ Anschläge wie in den Vereinigten Staaten können sich auch in Europa wiederholen. Von den sieben Ländern, die Terrorismus unterstützen, arbeiten angeblich fünf an Biowaffen. Die Terrorakte gegen New York und Washington lassen sich noch überbieten (siehe Seite 25 sowie weitere Artikel auf den Seiten 88 – 97). ■

TITELBILD:

Kannibalismus war früher offenbar nichts Ungewöhnliches, wie der eingeschlagene Schädel eines Neandertalers beweist. Der kolorierte Kupferstich illustrierte die brasilianischen Reiseberichte von Johannes Staden aus dem 16. Jahrhundert.

Foto: David Brill; Illustration: Theodor de Bry / AKG Berlin



TITELTHEMA:

Menschenfresser in der Altsteinzeit

Seite 38

Von Tim D. White

Anthropologen entdecken immer mehr Belege für menschlichen Kannibalismus – bei frühen Europäern und den Neandertalern ebenso wie bei prähistorischen hoch stehenden Völkern Amerikas.

ERDERWÄRMUNG

Schmelzen die Polkappen?

Von Frédérique Rémy und Catherine Ritz

Wenn sich das Eis der Antarktis und Grönlands infolge der globalen Erwärmung in Wasser verwandelt, kommt es zu weltweiten Überflutungen. Doch auf Klimaänderungen reagieren die Polkappen, wie neue Modelle ihrer Eisdynamik zeigen, erst mit mehrtausendjähriger Verspätung.



Seite 30

ATMUNG

Wie die Lunge Luft holt

Seite 46

Von Paul Dietl, Thomas Haller und Stefan W. Schneider

Wir könnten nur mühsam nach Luft ringen, gäbe die Lunge keine Stoffe ab, die den Kollaps der Lungenbläschen verhindern. Wie sie das macht, versuchen Forscher mit trickreichen Methoden und live an einzelnen Zellen zu ergründen.



COMPUTERSIMULATION

Simulierte Zellen

Seite 54

Von W. Wayt Gibbs

Schon die einfachste lebende Zelle ist so komplex, dass selbst Supercomputer ihr Verhalten wohl nie perfekt simulieren können. Aber auch unvollkommene Modelle können bereits die Grundlagen der Biologie erschüttern – und hoffentlich Medikamente entwickeln helfen.

Report: Terror und Trauma

Seite 88

Die Terroranschläge vom 11. September haben die Welt erschüttert. Fanatische Extremisten schrecken nicht mehr davor zurück, Massenmord mit Tausenden von Opfern als Mittel für ihre Zwecke einzusetzen. Unsere Gesellschaft steht damit vor einer gänzlich neuen Herausforderung. Sicherheits- und Terrorismusexperten berichten über die Folgen.



MIKROBIOLOGIE

Bekämpfung bakterieller Biofilme

Seite 58

Von J. W. Costerton und Philip S. Stewart

Für einige der hartnäckigsten Infektionskrankheiten sind Biofilme, gut organisierte Verbände von Bakterien, verantwortlich. Wer ihnen beikommen will, muss das Kommunikationssystem dieser Mikroben ausspionieren.

CHAOSFORSCHUNG

Das Ende des Schmetterlingseffekts

Seite 66

Von Raoul Robert

Angeblich folgt aus der Chaostheorie, dass Wettervorhersagen für Zeiträume von mehr als zwei Wochen unmöglich sind. Dieses Dogma ist mit Hilfe der statistischen Mechanik widerlegt worden.



Report: Moderne Lichttechnik

Seite 76



Angenehmer und wirtschaftlicher sollen Kunstlichtquellen sein. Neue Konkurrenz für die Glühbirne: Leuchtdioden.

Inhalt:

- Newcomer LED
- Die neue Sparsamkeit
- Plastik-Leuchtdioden
- Problem Recycling
- Licht-Psychologie

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Mein Computer versteht mich August 2001

Im Steckbrief des semantischen Netzes heißt es im letzten Satz: „Jeder Nutzer wird eine semantische Website mit handelsüblicher Standardsoftware selbst erstellen können."

Ich denke, zumindest in der Anfangsphase des semantischen Netzes muss dies, wenn es sich überhaupt durchsetzen soll, mit Public Domain Software möglich sein, d. h. mit Software, die jedem für seinen Rechner in Source, also im veränderbaren Programm-Urtext, im Netz verfügbar ist. Zumindest war das beim www einer der Gründe für seine schnelle Verbreitung: Die Webbrowser und -Server waren alle Public Domain und somit auf allen UNIX-Rechnern sofort verfügbar. Und heutzutage werden immer noch weit mehr als die Hälfte der Web-Server mit dem apache betrieben, der in der Public Domain ist. „Standardsoftware" klingt nach Windows und den zugehörigen Produkten, die zwar (noch) auf den Geräten der Masse der Nutzer laufen, aber bei solchen Innovationen meist doch sehr hinterherhinken.


MIGUEL SALMERON

Eckhard Rüggeberg, Lehrte

All ohne Urknall August 2001

Im Beitrag offenbart sich die neue Theorie, wie andere vor ihr auch, als Kombination von Wissenschaft und Fantasie: Auch die Ekpyrotiker denken sich eine Anfangssituation mit einer genau definierten Verursachung, die exakt so beschaffen war, dass durch sie und aus ihr heraus ein komplettes, funktionsfähiges und sogar lebensfreundliches Universum entstehen konnte. Diese Ur-Verursachung war, wie Herr Pössel im viertletzten Absatz schreibt, (natürlich!) „ja schon immer" vorhanden, bestand also seit aller Ewigkeit, ist selber nie erschaffen worden, bleibt unerforschlich und lebt allein im Glauben ihrer Jünger. Schon im ersten Buch Mose begegnet uns, wie Prof. Dr. Börner andeutet, der Weltenschöpfer, der ebenfalls „schon immer" existent war, der selber nie erschaffen wurde, unerforschlich bleibt und unbedingten Glauben einfordert. Somit hätte die Lehre von der Ekpyrose die große Wiedervereinigung von Wissenschaft und Religion endlich vollzogen.

Günter Ramdohr, Leutenbach

Wasserversorgung – jeder Tropfen zählt August 2001

Neue Umgangsformen mit Wasser, Abfall, Rohstoffen, Agrarprodukten usw. mögen notwendig und anzufordern sein, um einen Kollaps der menschlichen Versorgung aufzuhalten. Alle gut gemeinten Technologien haben aber vermutlich nur eine aufschiebende Wirkung, wenn nicht endlich auch das Kernproblem angegangen wird: die maßlose Überbevölkerung der Erde. Leider ist das in allen Artikeln immer noch ein verschwiegenes oder nur zaghaft am Rande berührtes Thema.

Wie wenige Menschen notwendig sind, um eine intakte Umwelt mehr oder weniger zu Grunde zu richten, lehrt spätestens die Antike: Immerhin haben es die Römer, Griechen und Phönizier geschafft, nahezu das gesamte Umfeld des Mittelmeeres nachhaltig zu entwalden. In dem Sinne sollte die Trendwende in den Industrieländern mit einem teilweise zu verzeichnenden langsamen Bevölkerungsrückgang positiv bewertet werden.

Prof. Dr. Gilbert Brands, Krummhörn


BULLATY / LOMEO / IMAGE BANK

Pont du Gard

Wissenschaftskommunikation – Forschung und Gesellschaft
August 2001

Gefahren der Künstlichen Intelligenz

Sprachlich schön an der englischen Wendung des „public understanding of science" ist die enthaltene Symmetrie zwischen der Aufgabe der Wissenschaft, die Öffentlichkeit zu verstehen, und der umgekehrten der Öffentlichkeit. Die drei Thesen von Mittelstraß leisten dabei wenig Hilfestellung. Schnelle Urteile über die Halbbildung und Mythen anderer tragen nicht zur wechselseitigen Verständigung bei. So versucht Mittelstraß die zugegeben poppig präsentierten Szenarien über die Gefahren der „Künstlichen Intelligenz" von Kurzweil und Joy durch den Hinweis zu entkräften, dass noch nicht einmal die Intelligenz der Fliege nachgebaut werden könne. Mit derselben Rhetorik ließen sich alle Gefahren des „künstlichen Flugs" beiseite schieben. Denn trotz Helikopter, Überschallflug, Weltallflug etc. können wir bisher nicht den Flug der Fliege simulieren. Warum jedoch sollte Künstliche Intelligenz eine 1:1-Abbildung der menschlichen sein? Wer pflegt hier die Mythen?

Mittelstraß' zweite These unterstellt den andern, „meist ... ideologisch" mit dem Risikodisput umzugehen. Eine These, die dann ja nicht mehr schief gehen kann, weil sie jeden und keinen trifft.

Zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis, technischer Erfindung und sozialem Wandel bestehen heute ständig wechselnde Austauschverhältnisse, sodass das klassische Kaskadenmodell zwischen Grundlagenforschung und Anwendung von Ergebnissen nicht mehr gilt. Die Gesellschaft wird überall mit wissensbasierter, aber ungesicherter Expertise überzogen – und verlangt zu Recht die Offenlegung der Risiken und Risikomodellierungen.

Prof. Wolfgang Krohn, Bielefeld

Scheitern von Kommunikation

Der Beitrag des Philosophen Jürgen Mittelstraß war selbst ein sehr schönes Beispiel für die Ursachen des Scheiterns von Wissenschaftskommunikation. Wer die punktgenauen Problemschwerpunkte von Dieter Simon für Weinerlichkeit hält und meint, der eigentliche Dialog fände prinzipiell zwischen „wissenschaftlichem" und „nichtwissenschaftlichem" Verstand – was auch immer das sein mag – statt, darf sich nicht wundern, wenn man nicht mit ihm reden will.

Christian Amling, Quedlinburg

Gewalttätig aus Größenwahn September 2001

Lernen, zu den Schwächen zu stehen

Im Grunde sind die zur Gewalt Neigenden keineswegs von Minderwertigkeitsgefühlen behaftet, maximal von ihrem eigenen Frust, ihrem wundervollen Bild von sich selbst nicht gerecht zu werden. Dies spricht für die Erkenntnis, dass die Instabilität ihrer Selbsteinschätzung eine bedeutungsvolle Rolle einnimmt. Sie sind klug genug, um ihre Mängel zu realisieren, die ihr selbstherrliches Bild schmälern. Wie Blaise Pascal beschrieb, meidet der Mensch die Konfrontation mit seinen Unzulänglichkeiten, bereits ein zur Selbstkritik fähiger Mensch hat damit seine Probleme, wie aber soll ein nur narzisstisch angehauchter Mensch damit umgehen? Kratzt nun ein anderer an seinem Bild und demonstriert ihm seine Unvollkommenheit, tut er alles, um sein Selbstbild wiederherzustellen, egal mit welchen Mitteln, also auch mit Gewalt. Je unsicherer er dabei wird, desto aggressiver.

Auf keinen Fall befürworte ich die Therapie, dass man Kinder zur übertriebenen Eigenliebe anhalten solle, auch ich sehe eine Gefahr darin. Kinder sollten lernen, auch zu ihren Schwächen zu stehen, sprich diese überhaupt zu erkennen.

D. Friehl, Bochum

TINA WEST

Aufgeblähtes Größenselbst

Aus der Drillausbildung für Folterer, Terroristen, auch Elite-Soldaten wissen wir, dass den Rekruten einerseits ihr Selbstgefühl, Selbstvertrauen und bisherige Identität mit körperlichen wie seelischen Torturen zerschlagen wird und andererseits gleichzeitig Größenfantasien implantiert werden.

Aus diesen Mechanismen – entsprechend auch aus in Kindheit und Jugend erfahrenen Traumatisierungen ähnlicher Art bzw. entehrenden gesellschaftlichen Bedingungen – entsteht dann aber kein normales, begründetes Selbstvertrauen, sondern ein aufgeblähtes Größenselbst. Dieses droht immer wieder auf das dahinter liegende auch gelernte „Du bist ein Nichts“ zurückzufallen, eine der schlimmsten Kränkungen überhaupt. Diese Erniedrigung kann dann leider damit aufgefangen werden, dass sich „zum Herren über Leben und Tod eines anderen“ gemacht wird, Macht ausgeübt, getötet, gefoltert wird und damit wieder ein inneres Größengefühl – illusionärer Art – entsteht. Die Richtung, die die Destruktivität dann nimmt, wird durch das in der Ausbildung mit induzierte Feindbild bestimmt, bzw. trifft gesellschaftliche Minderheiten und speist sich aus dem reaktiven, auf die Drilltorturen hin sich bildenden Hass-Affekt.

Dr. med. Peter Boppel, Bad Arolsen

Erratum

Interview im Technoskop – Oktober 2001

Im Begleittext zu dem Bild auf der Seite 83 heißt es: „Klein, überschaubar und ein bisschen anders als der Rest der Europäischen Union ...“ Dazu ist anzumerken, dass die Isle of Man eine „Crown Dependency“ ist, also weder ein Teil des Vereinigten Königreiches noch der Europäischen Union.

Die Redaktion

Gefrorenes Licht

September 2001

Ich möchte Sie darauf hinweisen, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum per Definition 299792458 m/s und nicht wie angegeben 299793458 m/s beträgt.

N. Mikuszeit, Hamburg

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels,
Postfach 10 48 40,
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729



Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 91 26-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Immo Diener, Hermann Englert, Dr. Andrea Kamphuis, Dr. Susanne Lipps, Bettina Trabert, Dr. Klaus Volkert.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 13,50/€ 6,90/sfr 13,50/öS 98,–; im Abonnement DM 147,86/€ 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 127,91/€ 65,40. Die Preise beinhalten DM 11,73/€ 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 11,74/€ 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Weltbild Verlag, Augsburg; Schünemann, Bremen; ABZ-Verlag, Zürich/Schweiz; Giordano, Italien; VNR-Verlag, Bonn; Dreiviertel Verlag, Hamburg und Gruner & Jahr (PM), Hamburg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Denise Anderman, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

LINGUISTIK

Das altägyptische Wörterbuch

Ergebnis eines Jahrhundertprojekts im Internet

Eine Dokumentation von rund 3500 Jahren ägyptischer Sprachgeschichte – die bislang umfassendste lexigraphische Auswertung von Texten aus dem Pharaonenreich – ist nun per Internet der Öffentlichkeit zugänglich.

Von Markus Pössel

Manche wissenschaftlichen Projekte liefern Resultate, die den Rahmen herkömmlicher Zeitschriften- und Buchformate sprengen. Ihre Veröffentlichung war lange Zeit ein kaum lösbares Problem. Hier hat das Internet neue Wege geebnet – insbesondere in Gestalt des World Wide Web, das die Publikation größerer Materialmengen erleichtert und in einigen Fällen überhaupt erst ermöglicht. Wenn die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften dieser Tage die letzten Teile des Zettelarchivs des Berliner Altägyptischen Wörterbuchs zugänglich macht, geschieht das in einer Form, die sich die Initiatoren des Projektes mit Sicherheit nicht haben träumen lassen. Denn was da unter der Adresse http://aaew.bbaw.de ins Netz gestellt wird, kann auf eine über hundertjährige Geschichte zurückblicken.

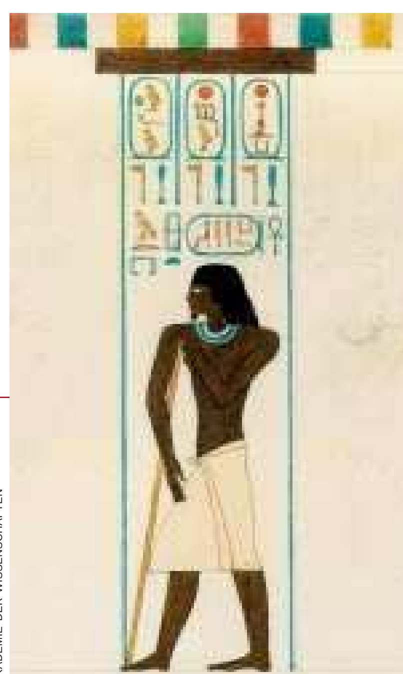
Zu Projektbeginn Ende des 19. Jahrhunderts war die Erforschung der altägyptischen Schriften zwar bereits den Kinderschuhen entwachsen, und in den über achtzig Jahren seit den bahnbrechenden Arbeiten von Thomas Young und Jean François Champollion hatte das Sprachverständnis der Ägyptologen gewaltig zugenommen. Allerdings ging mit den Fortschritten auch ein verstärktes Problembewusstsein einher; der Pioniergeist der Entzifferer wich dem Ehrgeiz, die Erkenntnisse zur ägyptischen Sprache wissenschaftlich möglichst allgemein gültig und rigoros zu belegen und zu begründen. Das konnte nur gelingen, indem man alle vorhandenen Texte systematisch durchforstete und sich bemühte, Wortbedeutungen und grammatikalische Regeln aus dem Zusammenhang und dem Vergleich mit Parallelstellen zu erschließen. Dazu wiederum war es notwendig, das Material in einer Form aufzubereiten, die die systematische Suche nach bestimmten Wörtern überhaupt erst zuließ.

Dieser gewaltigen Aufgabe nahm sich der Berliner Ägyptologe Adolf Erman an – mit einem umfassenden Wörterbuch der ägyptischen Sprache als Ziel. Dabei war er sich sehr wohl bewusst, dass die Arbeit das Vermögen eines einzelnen Gelehrten bei weitem übersteigen würde, und plante entsprechend ausgreifend. Als sein Wörterbuchprojekt 1897 anlief, geschah dies mit Unterstützung der wissenschaftlichen Akademien von Berlin, Göttingen, Leipzig und München. Die Liste der über sechzig Wissenschaftler aus dem In- und Ausland, deren Mitarbeit sich Erman versichern konnte, liest sich wie ein Who-is-who der damaligen Ägyptologie.

In Berlin stand dem Projekt bereits ein Grundstock an Material zur Verfügung: die umfangreiche Dokumentation der preußischen Ägypten-Expedition, die der Linguist und Archäologe Carl Richard Lepsius (1810–1884) in den Jahren 1842 bis 1845 durchgeführt hatte. Zudem besuchten Mitarbeiter sowohl Ägypten als auch alle ägyptischen Sammlungen europäischer Museen. Dort erstellten sie tausende Seiten genauer Abschriften aller zugänglichen Texte, glichen bereits veröffentlichte Texte mit den Originalen ab und fertigten hunderte und aberhunderte Abklatsche an: Blätter von Spezialpapier, die, in nassem Zustand auf ein Relief gedrückt und nach dem Trocknen abgenommen, dessen Aussehen plastisch wiedergeben.

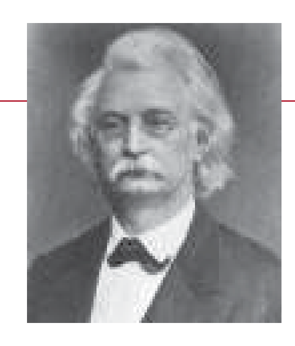
Die Früchte dieser Arbeit, eine umfassende Dokumentation von rund 3500





ALLE DREI MOTIVE: BERLIN-BRANDENBURGISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

Einen wichtigen Grundstock der Arbeit am ägyptischen Wörterbuch lieferte das reichhaltige Material der preußischen Ägypten-Expedition von 1842–1845 unter Carl Richard Lepsius (unten) – darunter diese kolorierten Zeichnungen von Wandmalereien aus dem Grab des Priesters Neferbau-Ptah in Gizeh (um 2350 v. Chr., links) und des Vizekönigs Hui in Theben (um 1340 v. Chr.) bei der Entgegennahme von Tributen für den Pharao Tut-ench-Amun.



Jahren ägyptischer Sprachgeschichte, wurden zur Auswertung nach Berlin verbracht. Dort begannen Projektmitarbeiter mit der Analyse des Textkorpus, indem sie jedes Wort der zusammengetragenen Texte samt Fundstelle und Kontext auf einem eigenen Karteizettel festhielten. Dabei notierten sie auch die (anfangs oft nur vermutete) Lautfolge, ausgedrückt in dem aus 25 Buchstaben bestehenden ägyptologischen Transkriptionsalphabet; sie bildete die Grundlage für die alphabetische Sortierung der Wörter.

Im Jahre 1909 wurde zudem mit der Feinordnung der ersten 900 000 Zettel begonnen. Dabei erschlossen die Wissenschaftler aus dem Textzusammenhang und durch Vergleich mit den Parallelstellen die Bedeutungsspektren der Wörter und sortierten die Belege für jedes Wort nach Gebrauch, Vorkommen in bestimmten Sprachwendungen, grammatischer Form, aber auch verschiedenen Schreibweisen.

Schwer zugängliche Schätze

Welche Impulse Ermans Projekt der ägyptologischen Forschung gegeben hat, zeigen nicht zuletzt eine Reihe von Standardwerken. So entstanden viele Textausgaben ägyptischer Inschriften oder das „Lexikon der ägyptischen Personennamen“ in Zusammenhang mit der Arbeit an dem Wörterbuch. Ermans ursprüngliches Vorhaben, die Ergebnisse des Projekts in Buchform zu veröffentlichen, ließ sich dagegen ob der enormen Materialfülle technisch wie finanziell nicht verwirklichen. Als Kompromisslösung wurde ein verschlanktes Wörterbuch erstellt, das lediglich auf einer Auswahl an Belegen beruhte. Erman und sein Schüler Hermann Grapow gaben zwischen 1925 und 1931 die grundlegenden ersten fünf Bände dieses Werkes heraus.

Nach Ermans Tod im Jahre 1937 führte Grapow auch die Veröffentlichung der Belegstellen- und Indexbände fort, die das „Wörterbuch der ägyptischen Sprache“ bis 1963 ergänzten. Parallel wurden Aufbereitung und „Verzettelung“ neuer Texte noch bis 1940 fortgesetzt. Obschon das gedruckte „Wörterbuch“ nur einen Teil der in den Zettelarchiven vorhandenen Informationen enthält, ist es bis heute das vollständigste seiner Art: ▶

Einmaliges Zettelarchiv

Die Belegzettel für das Vorkommen eines jeden Wortes in altägyptischen Texten, die nunmehr im Internet zugänglich sind, bilden ein unschätzbares Forschungswerkzeug für alle, die sich mit dem einstigen Pharaonenreich am Nil beschäftigen. So wird ein Ägyptologe, der im Rahmen einer Übersetzungsarbeit etwa das Bedeutungsspektrum des Verbs mit der Transkription „śD“ („zerbrechen“) ausloten möchte, neben rund 400 anderen Belegstellen für dieses Wort auch auf den hier abgebildeten Zettel stoßen.

In der rechten oberen Ecke steht die Transkription des Wortes, für das dieser Zettel den Beleg nennt – in diesem Falle śDw. Sie repräsentiert den konsonantischen Teil des Lautinhaltes. Angegeben ist jeweils auch der Textzusammenhang, in dem das Wort auftritt. In unserem Beispiel handelt es sich um einen Ausschnitt aus der so genannten Semna-Stele: einem Grenzstein von Sesostris III., der sich heute mit der Inventarnummer 1157 im Ägyptischen Museum in Berlin befindet. Die hieroglyphische Schreibung des Wortes ist im Text rot unterstrichen, rechts daneben findet sich die Übersetzung des Textes, in dem Sesostris die unvorteilhaften Eigenschaften seiner nubischen Feinde beschreibt.

Außerdem erlauben die Zettel interessante Einblicke in die Arbeit des Wörterbuchprojekts. Das hier abgebildete Beispiel etwa lässt erkennen, dass sich die Lesung des betreffenden Wortes im Verlauf der Bearbeitung geändert hat. Dazu muss man wissen, dass die Ägypter in der Regel nicht nur den Lautinhalt ihrer Wörter niederschrieben, sondern zusätzlich ein oder mehrere Zeichen, die allgemeine Hinweise auf die Bedeutung des Wortes geben (etwa laufende Füße für Wörter des Bedeutungskreises „gehen, laufen“ oder ein liegendes Kreuz für den Bedeutungskreis „brechen, teilen, überkreuzen“).

BERLIN-BRANDENBURGISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

Beispiel aus dem Zettelarchiv zum ägyptischen Wörterbuch

Das hier gezeigte Wort śDw wurde ursprünglich auf Grund des Deutezeichens, das einen Rinderschenkel darstellt, fälschlich als „Schenkel“ übersetzt. Doch dann machte eine Parallelstelle den Irrtum klar: Auf der so genannten Uronarti-Stele desselben Königs steht ein gleich lautender Text; dort ist das entsprechende Wort aber mit einem liegenden Kreuz als Deutezeichen geschrieben. Demnach handelt es sich um eine abweichende Schreibung des durch viele weitere Belege abgesicherten Verbs „śD“ für „zerbrechen“. Der Rinderschenkel ist schlicht ein Flüchtigkeitsfehler des Schreibers, der den Text von einer Vorlage auf die Steinstele übertrug: In der hieratischen Alltagsschrift sehen sich der Rinderschenkel und der stilisierte schlagende Arm, mit dem „śD“ oft geschrieben wird, sehr ähnlich. Hieroglyphischer Text und Übersetzung der erhellenden Parallelstelle sind unten vermerkt worden. Das blaue Kreuz rechts oben zeigt an, dass der Zettel als besonders aufschlussreiche Belegstelle für das gedruckte Wörterbuch ausgewählt wurde; der Verweis trägt, wie in rot notiert, die Nummer 22 auf Seite 374 des entsprechenden (vierten) Wörterbuchbandes. ■

ein Standardwerk, das zu den wichtigsten Werkzeugen nicht nur der deutschsprachigen Ägyptologen zählt.

Doch wer über das gedruckte Lexikon hinaus das zusammengetragene Material in größerem Stile nutzen wollte, dem blieb nur der persönliche Weg in die Arbeitsstelle im Akademiegebäude „Unter den Linden“, die Ermans Erbe sorgsam bewahrt. Erst in den letzten beiden Jahrzehnten rückte die Entwicklung von Computern, Datenbanksystemen und erschwinglichen Massenspeichern eine Veröffentlichung des gesamten Zettelarchivs in den Bereich des Machbaren.

Segnungen der Elektronik

Angedacht hatten die Mitglieder der neu gegründeten Wörterbuchkommission ein „elektronisches Wörterbuch“ bereits in den achtziger Jahren. Doch erst 1997 konnten sie – dank verbesserter finanzieller Möglichkeiten nach der Wiedervereinigung und einer Projektförderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft – zur Verwirklichung des „digitalisierten Zettelarchivs“ schreiten. Freilich war es mit dem bloßen Scannen der 1,5 Millionen Karten beileibe nicht getan. Um das Material wirklich nutzbar zu machen, musste jede der Bilddateien mit einem zentralen Index verknüpft werden, der Übersetzung, Transkription und die Stellung des betreffenden Zettels in der systematischen Feinordnung erfasst (und zudem berücksichtigt, ob sich die Lesart des betreffenden Wortes im Lichte neuerer Forschung geändert hat). Erste Teile des Archivs sind seit 1999 online verfügbar; mit dem Abschluss der arbeitsintensiven Erfassung Ende Oktober dieses Jahres und der nachfolgenden Veröffentlichung im World Wide Web ist das vollständige Material jetzt weltweit per Mausklick zugänglich.

Für die Mitarbeiter der Arbeitsstelle bildet das digitale Zettelarchiv allerdings nur eine Zwischenstation auf dem Weg zu einer noch weit umfassenderen Datenbank. Diese soll zum einen auch den umfangreichen Korpus jener Textquellen erfassen, die erst nach Abschluss der Verzettelungsarbeit für das Ermansche Wörterbuch bekannt wurden. Zum anderen soll sie das elektronisch erfasste Material in vielfältiger Weise recherchier- und analysierbar machen. Die bislang unveröffentlichte, vorläufige Version dieser Textdatenbank lässt erahnen, welche Möglichkeiten sie einmal bieten wird – von der Suchfunktion, die auf Tastendruck alle Belege für eine bestimmte Kombination grammatischer Elemente aufzeigt, bis zum topographischen Verzeichnisbaum, in dem sich der Benutzer mit der Maus zunächst zu einem Ortsnamen durchklicken kann, dann beispielsweise zu einem bestimmten Tempel, einem Tempelraum und schließlich einer Wand dieses Raumes, um endlich Transkription, Übersetzung, grammatikalische Aufschlüsselung und eine Faksimile-Abbildung des entsprechenden Wandtextes vor sich zu sehen.

Mag die Textdatenbank dem Zettelarchiv auch in technischer Hinsicht um Lichtjahre voraus sein, so gilt eines weiterhin: Bis zum Erreichen des Fernziels – einer erschöpfenden Datenbank aller bekannten ägyptischen Texte – wird noch viel Zeit, Arbeit und Geld investiert werden müssen. ■



BERLIN-BRANDENBURGISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN



FRONTISPIZ AUS: A. ERMAN, „MEIN WERDEN UND MEIN WIRKEN“

Der Berliner Ägyptologe Adolf Erman (unten) begründete 1897 die Arbeit am Ägyptischen Wörterbuch. Für eine Bestandsaufnahme möglichst vieler Texte reisten Projektmitarbeiter nach Ägypten und fertigten Abklatsche in Stein gemeißelter Inschriften an: Angefeuchtetes Spezialpapier, auf das Relief gedrückt, lieferte nach dem Trocknen eine plastische Kopie.

Markus Pössel *promoviert am Albert-Einstein-Institut in Potsdam im Bereich Quantengravitation und hat daneben ein Faible für das Pharonenreich.*

THEORETISCHE PHYSIK

Nagt der Zahn der Zeit auch an Naturkonstanten?

Astronomischen Beobachtungen mit dem Keck-I-Teleskop auf Hawaii zufolge könnte die fundamentale physikalische Konstante „Alpha“ früher kleiner gewesen sein als heute – im Einklang mit Vorhersagen neuerer Teilchentheorien.

Von Georg Wolschin

Das ursprüngliche Konzept der klassischen Physik, wonach die Naturwissenschaften von einem Satz unveränderlicher Größen – den Naturkonstanten – getragen werden, ist schon lange nicht mehr haltbar. So sind die Kopplungskonstanten, welche die Stärke der vier fundamentalen Wechselwirkungen bestimmen, abhängig von der Energie, bei der sie gemessen werden.

Das gilt auch für die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante Alpha, von der die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung abhängt. Sie setzt sich ihrerseits aus drei Naturkonstanten zusammen: der Ladung des Elektrons e, der Planckschen Konstanten geteilt durch 2π, die mit $\hbar$ bezeichnet wird, und der Lichtgeschwindigkeit c; es gilt: $\text{Alpha} = e^2/(\hbar c)$. Bei ruhenden Teilchen beträgt ihr Wert etwa 1/137,036. Bei einer hochenergetischen Kollision im Beschleuniger kann er jedoch bis auf etwa 1/128 steigen.

Nun gibt es erste Indizien dafür, dass Alpha nicht nur mit der Energie, sondern möglicherweise auch mit der Zeit – genauer gesagt der Raumzeit – variiert (*Physical Review Letters, Bd. 87, S. 091301-1*). Das überrascht nicht völlig; denn eine solche Abhängigkeit wird in modernen Theorien erwartet, die eine Vereinheitlichung der drei für die Teilchenphysik wichtigen Wechselwirkungen mit der Gravitation zum Ziel haben. Andererseits werden im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie Naturkonstanten als echte Konstanten angenommen, die weder von der Zeit noch von der jeweiligen kosmologischen Entwicklung des Universums abhängen. Bisher hatten Laborexperimente über 140 Tage und Messungen von Elementhäufigkeiten am Oklo-Reaktor in Gabun, in dem vor 1,8 Milliarden Jahren eine natürliche Kettenreaktion stattfand, die Konstanz von Alpha weitgehend bestätigt; danach sollte eine mögliche Abweichung, auf ein Jahr bezogen, kleiner als $3{,}7 \times 10^{-14}$ beziehungsweise $5{,}0 \times 10^{-17}$ sein.

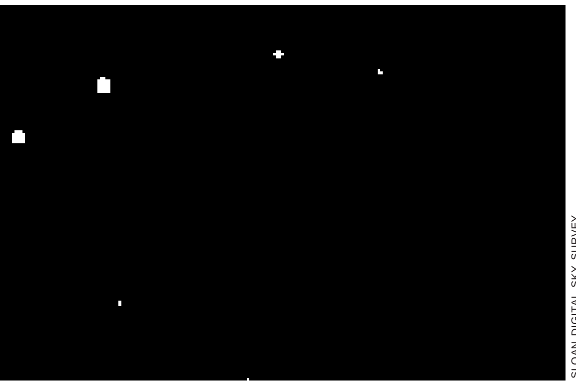
Ein anderes Ergebnis erhielt jetzt jedoch eine Wissenschaftlergruppe um John Webb von der Universität von Neusüdwales in Sydney und John Barrow von der Universität Cambridge. Um frühere Werte von Alpha zu ermitteln, untersuchten die Forscher das Licht ferner Quasare. Es durchquert auf dem Weg in unser Sonnensystem Gaswolken, in denen es teilweise verschluckt wird. Die zugehörigen Absorptionslinien sind auf Grund der Expansion des Kosmos um einen Betrag rotverschoben, der das Alter der Wolken verrät. Aus der Feinstruktur der Linien lässt sich zugleich der einstige Wert von Alpha am Ort der Gaswolke bestimmen.

Ein folgenreicher Unterschied

Das Forscherteam untersuchte Quasare aus einem Zeitraum, der 23 bis 87 Prozent des Alters des Universums überdeckt – was Rotverschiebungen zwischen 3,5 und 0,5 entspricht. In jedem Fall ermittelten sie ein Alpha, das kleiner als der heutige Laborwert ist: Die relative Abweichung beträgt zwar nur 7,2 Millionstel, ist aber statistisch signifikant. Im früheren Universum hätte Alpha demnach einen Wert von ungefähr 1/137,037 statt 1/137,036 gehabt – ein kleiner Unterschied, der jedoch große Auswirkungen auf moderne Theorien zur Naturbeschreibung haben kann.

Die interstellaren Gaswolken enthalten Elemente wie Natrium, Magnesium, Silizium und Eisen, die durch das einfallende rotverschobene Quasarlicht angeregt werden. Die Energieniveaus der ▶





SLOAN DIGITAL SKY SURVEY



STERNE UND WELTRAUM

Mit dem Hires-Spektrographen am Keck-Teleskop auf dem Mauna Kea in Hawaii (oben) führte eine australisch-britisch-amerikanische Forschungsgruppe Messungen an Absorptionslinien von Quasaren (links) durch, die auf eine Zeitabhängigkeit der Feinstrukturkonstanten Alpha hindeuten.

Atome und Ionen zeigen dabei eine so genannte relativistische Feinstrukturaufspaltung, deren Größe von Alpha abhängt. Auf diese Weise lässt sich anhand der Absorptionslinien die Feinstrukturkonstante bei vergleichsweise großen Rotverschiebungen messen.

Doch ist die Methode in dieser Form noch nicht präzise genug. Deshalb führte die Gruppe um Webb und Barrow 1999 ein erweitertes Verfahren ein, das sie auch in der jetzigen, umfassenderen Arbeit einsetzte. Dabei wird eine Kombination von Absorptionslinien untersucht, die von den Grundzuständen verschiedener Elemente ausgehen („Vielfach-Multiplett-Methode“). Die so erzielbare Genauigkeit hat den Nachweis einer möglichen Zeitabhängigkeit von Alpha in greifbare Nähe gerückt. Voraussetzung ist allerdings ein Spektrograph mit exzellenter spektraler Auflösung und einem hohen Signal-zu-Untergrund-Verhältnis. Ein solches Gerät steht an den beiden Keck-Teleskopen auf Hawaii zur Verfügung.

Erstmals untersuchten die Forscher mit der Vielfach-Multiplett-Methode vor zwei Jahren 30 Absorptionssysteme in interstellaren Gaswolken im Licht von 17 Quasaren. Dabei analysierten sie speziell die Eisen- und Magnesiumlinien. Schon damals ergaben sich im Rotverschiebungsbereich zwischen 0,5 und 1,6 deutliche Anzeichen dafür, dass die Feinstrukturkonstante in der Vergangenheit kleiner war. Die Abweichung betrug 10,9 Millionstel, aber die Standardabweichung war etwa doppelt so groß wie jetzt.

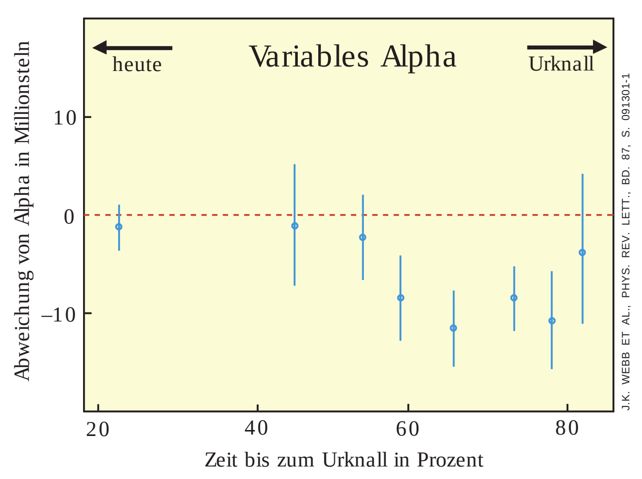
Für die nun veröffentlichte Arbeit wurden diese Daten nochmals gründlich analysiert und neue vom Keck-Teleskop hinzugefügt. Sie stammen von Absorptionssystemen mit Rotverschiebungen zwischen 1,8 und 3,5 im Licht von 13 weiteren Quasaren und berücksichtigen Übergänge in zahlreichen Elementen.

Ein Hauch von Veränderung

Ferner zog die Gruppe um Webb und Barrow frühere, von anderen Teams gemessene Daten heran und verwendete zudem Messungen an der 21-Zentimeter-Linie des neutralen Wasserstoffatoms. Diese Spektrallinie wird ausgesandt, wenn sich die relative Orientierung der Spins von Elektron und Proton im Wasserstoffatom ändert. Aus ihrer Messung in Absorption ergibt sich eine obere Schranke für das Produkt aus dem so genannten g-Faktor, der die magnetischen Eigenschaften des Protons bestimmt, und dem Quadrat der Feinstrukturkonstanten – und damit ebenfalls ein Hinweis auf eine mögliche Veränderlichkeit von Alpha bei derzeit zwei Rotverschiebungswerten (0,25 und 0,68). Dabei wird der g-Faktor als konstant angenommen. Insgesamt trugen die Forscher aus England, Australien und den USA 72 Schätzwerte für Alpha im Rotverschiebungsbereich zwischen 0,5 und 3,5 zusammen.

Der erste Datenpunkt aus einer Messung der 21-Zentimeter-Linie von Wasserstoff bei einer Rotverschiebung von 0,25 zeigt zwar keine statistisch signifikante Abweichung der Feinstrukturkonstanten vom Laborwert, aber für größere Rotverschiebungen liefern die Messungen mit der Vielfach-Multiplett-Methode übereinstimmend den schon erwähnten verkleinerten Wert von Alpha.

Wie verlässlich ist das Ergebnis? In ihrer Veröffentlichung diskutieren die Forscher mögliche systematische Fehler. Die wichtigsten sind die Dispersion des Quasarlichts in der Atmosphäre – es wird ▶



J.K. WEBB ET AL., PHYS. REV. LETT., BD. 87, S. 091301-1

Messungen an Quasar-Absorptionslinien zufolge war die Feinstrukturkonstante Alpha in der knappen ersten Hälfte der Existenz des Universums deutlich kleiner als der heutige Laborwert von 1/137,036.

dadurch je nach Wellenlänge an unterschiedliche Stellen im Spektrometer gelenkt – sowie die nicht genau bekannte zeitliche Entwicklung der Elementhäufigkeiten in den absorbierenden Gaswolken. Beide Effekte würden Alpha jedoch in umgekehrter Richtung ändern und scheiden deshalb als mögliche Erklärungen des Messergebnisses aus, ja sie vergrößern sogar dessen Zuverlässigkeit.

Falls das Resultat also stimmt, welche Bedeutung hat es dann für die Physik? Paul Dirac wies schon 1937 darauf hin, dass nicht alle drei Größen, von denen Alpha abhängt, in gleicher Weise fundamental sein können. Er selbst hielt die Lichtgeschwindigkeit wegen ihrer grundlegenden Rolle in der Speziellen Relativitätstheorie für elementar. Dasselbe glaubte er von der Elementarladung e; folglich betrachtete er das Wirkungsquantum als ableitbar. Heute geht man in der Regel von Lichtgeschwindigkeit und Wirkungsquantum als elementaren Größen aus (die in geeigneten Maßsystemen gleich 1 gesetzt werden); eine Zeitabhängigkeit von Alpha wäre dann gleichbedeutend mit einer entsprechenden Variabilität von e.

Zurück zu den Anfängen des Kosmos

Ganz allgemein passen veränderliche Naturkonstanten zu den so genannten Superstring-Theorien, mit denen man die vier grundlegenden Wechselwirkungen zu vereinheitlichen sucht. In ihrem Rahmen ergeben sich für die dimensionslosen Kopplungskonstanten Zeitabhängigkeiten, die miteinander korreliert sind. In kosmologischen Zeiträumen ist davon nicht nur Alpha betroffen, sondern auch die Gravitationskonstante G. Bei dieser hat man aber bereits erhebliche Mühe, den heutigen Wert mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen. Deshalb wird sich die Suche nach Zeitabhängigkeiten von Naturkonstanten im Rahmen der Evolution des Kosmos auch in Zukunft auf Alpha konzentrieren.

Besonders interessant wären Werte aus dem frühen Universum. In der so genannten Planck-Ära waren die vier fundamentalen Wechselwirkungen noch vereinigt. Später gab es vermutlich eine Phase extrem schneller Expansion („Inflation“), und es kam zu einer Aufspaltung in die heutigen Grundkräfte. Eine Extrapolation der vorliegenden Ergebnisse in diese Zeit ist allerdings völlig ausgeschlossen. Die Vereinigung von Kernen und Elektronen zu neutralen Atomen – als das Universum für Strahlung durchsichtig wurde – fand dann bei einer Rotverschiebung von 1000 statt. Auch das ist noch weit jenseits des Bereichs der beschriebenen Messungen. Atome werden durch die Coulombkraft zusammengehalten, deren Stärke von Alpha abhängt. Sollten bei ihrer Bildung Abweichungen in der Feinstrukturkonstanten aufgetreten sein, wäre das besonders aufschlussreich. Eine hinreichend genaue Alpha-Messung bei Rotverschiebungen von 1000 liegt jedoch weit außerhalb heutiger Möglichkeiten. Immerhin schließen die jüngsten Ballonmessungen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes, dessen Ursprung in die Frühzeit des Universums zurückreicht, nicht aus, dass Alpha damals erheblich kleiner war – bis um einige Prozent. ■

Georg Wolschin ist Theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.

Am Rande

Brauchen wir eine „Royal Society“?

Bei der Diskussion darüber, ob Stammzellforscher nun Kannibalen sind oder nicht, fiel es wieder einmal unangenehm auf: Deutschland hat keine nationale (Verzeihung: bundesweite) Akademie der Wissenschaften, die in solch heiklen Streitfällen höhere Weisheiten beisteuern und der Politik beratend zur Seite stehen könnte. Der von der Regierung erst kürzlich eingesetzte Ethikrat läuft sich noch warm, die regionalen Akademien können sich nicht einigen, ob sie ein bundesweites Konsortium gründen wollen oder nicht, und die Forscher stehen bei ethisch brisanten Fragen allein im Hagel der Kritik.

Als Vorbild wird dann oft die britische Royal Society genannt, die im Jahre 1660 als erste Wissenschaftsakademie der Welt gegründet wurde. Die Gesellschaft, die auch Forschungsgelder verteilt, wählt einmal jährlich bis zu 42 neue Mitglieder aus dem Commonwealth oder Irland, die dann die Buchstaben „FRS“ (Fellow of the Royal Society) hinter ihrem Namen tragen dürfen. Der Haken ist nur, dass die Neuzugänge von den existierenden Mitgliedern sowohl vorgeschlagen als auch gewählt werden. Ein derart geschlossenes System neigt natürlich zu einer konservativen Fortschreibung des Bestehenden. Vertreter neuer Ideen, Frauen, Angehörige von Bevölkerungsminderheiten und alle, die außerhalb des Oxbridge-Systems stehen, haben es möglicherweise schwerer.

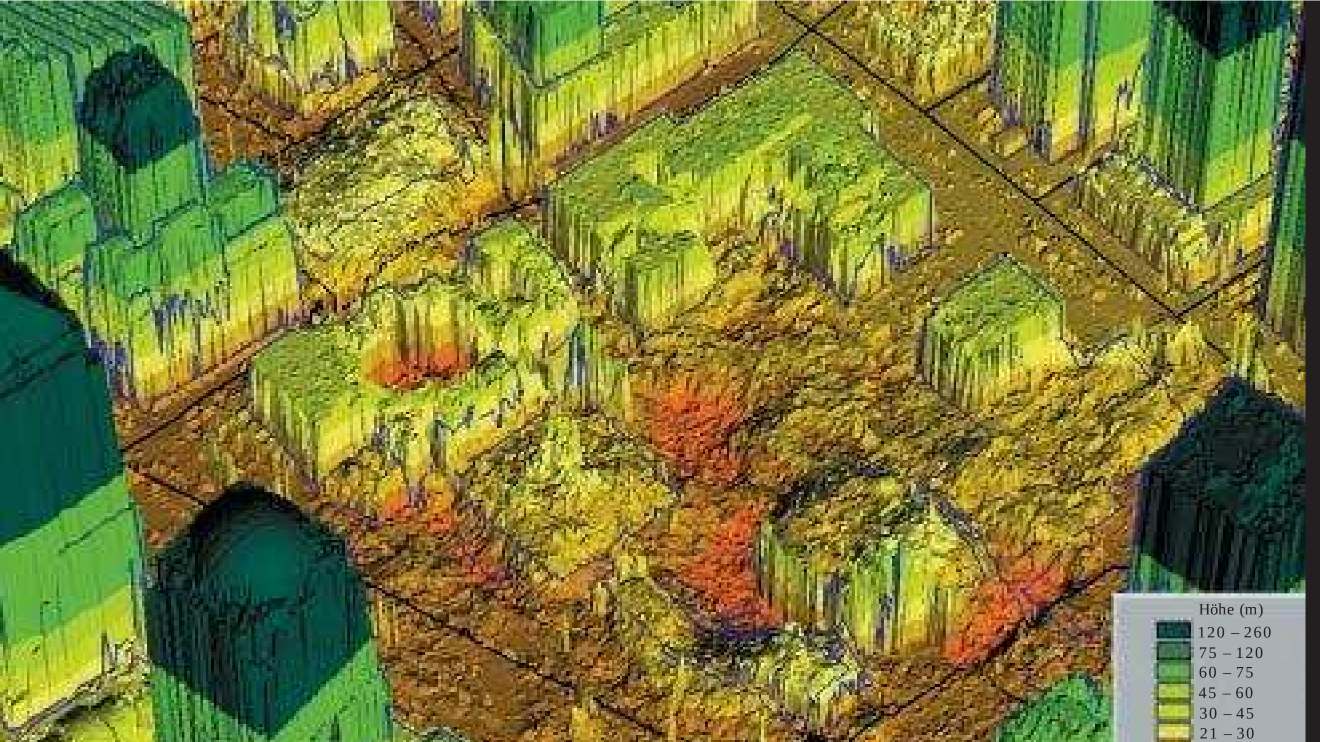
Zum Beispiel neue Ideen: Tim Berners-Lee, der Erfinder des World Wide Web, ist ein britischer Wissenschaftler, aber bis vor einem Jahr war es keinem der 1400 Mitglieder der Royal Society aufgefallen, dass er vielleicht etwas Nützliches geleistet hat. Jedenfalls hat ihn niemand für die Wahl zum FRS vorgeschlagen, bis Robert May, der ehemalige Wissenschaftsberater der britischen Regierung, sein neues Amt als Präsident der Royal Society antrat und die peinliche Unterlassung aufdeckte.

Zum Beispiel Frauen: Die Pionierin der Proteinkristallographie Dorothy Hodgkin erhielt von ihrem Doktorvater die Prognose, sie werde für ihre Arbeit den Nobelpreis bekommen, aber mit den drei Buchstaben sei es etwas schwieriger. Sie bekam dann doch beides, blieb aber Mitglied einer kleinen Minderheit. Bis heute liegt der Frauenanteil unter den FRSs unter vier Prozent – eine Zahl, die schon so peinlich ist, dass einem der Spott im Halse stecken bleibt.

Und wie steht es um den Beitrag der Akademie zur gesellschaftlichen Meinungsbildung? Dieser findet eher unauffällig im Hintergrund statt – mit Maßnahmen zur Wissenschaftsvermittlung, Gutachten zu (halbwegs) aktuellen Fragen und so weiter. Wenn es akut brennt, hat die Royal Society gar nicht die organisatorischen Voraussetzungen, um in das Geschehen einzugreifen. Während der eskalierenden Krise um die Maul- und Klauenseuche war zum Beispiel wenig von ihr zu sehen oder zu hören.

Vielleicht liegt das Problem ja einfach darin, dass ein Verein alter Männer, der lediglich durch alljährliches Klonieren (Verzeihung: Nachwählen) die Verstorbenen ersetzt, mit den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Umwälzungen im 21. Jahrhundert nicht immer mithalten kann. Die Royal Institution in London plant derzeit die Einrichtung eines mit professionellen Mitarbeitern besetzten Wissenschaftszentrums, das als Informationsbörse und Schaltstelle zwischen Wissenschaft, Gesellschaft und Politik dienen soll. Ich kann mir vorstellen, dass eine solche Einrichtung auch der Bundesrepublik mehr nützen würde als eine nationale Akademie.

Michael Groß
www.michaelgross.co.uk



ALLE BILDER: REUTERS

Karten des Grauens

Als die Trümmer des World Trade Center noch unter Staub- und Rauchwolken lagen, entstanden aus der Luft per Lidar die ersten Bilder der Stätte der Verwüstung: Die Laufzeiten von 15 000 Infrarot-Laserpulsen pro Sekunde, die ein Flugzeug der Firma EarthData in 1500 Metern Höhe aussandte, lieferten dreidimensionale Karten des Gebiets (oben). Ihre horizontale Auflösung beträgt 1,5 Meter, die vertikale 15 Zentimeter. Mit Wärmesensoren wurden außerdem die Temperaturen gemessen. Vergleiche zwischen Aufnahmen an verschiedenen Tagen sollten Setz- und Rutschbewegungen sowie sich entwickelnde Brände aufzeigen, von denen eine Gefahr für die Bergungsteams ausgehen konnte. Die Grafik unten markiert den Zerstörungsgrad der Gebäude im Südteil Manhattans.

verschmutzt

beschädigt, aber bewohnbar

unbewohnbar

zerstört

einsturzgefährdet

DAMPFMASCHINE UND DREHORGEL

Die stehende Dampfmaschine D456 ist voll funktionsfähig. Beheizung mit Trockenbrennstoff.
Maße Sockel 145 x 205 mm,
Höhe mit Kamin 330 mm;
DM 309,–/€ 157,99.

Kombipreis für Drehorgel und Dampfmaschine;
DM 534,–/€ 273,03.



Die Drehorgel ist ein Originalnachbau einer klassischen Straßenorgel. Sie kann sowohl mit einer Dampfmaschine als auch von Hand betrieben werden. Durch ihren großen Resonanzraum und die Verarbeitung von edelstem Holz hat die Orgel einen wunderschönen Klang. Das mechanische Musikwerk basiert auf einer Notenbandsteuerung, die es seinem Betreiber ermöglicht, unendlich viele Melodien zu spielen.
Maße ca. 220 × 150 × 160 mm; DM 239,-/€ 122,20.

BRIEFBESCHWERER „SEXTANT“

In den Glasquader wurde mittels modernster Lasertechnik ein Sextant dreidimensional eingearbeitet. Format 40 × 40 × 40 mm; DM 59,–/€ 30,17.

BLECHSCHILD „KAMEL“

Das Motiv dieses nostalgischen Blechschilds war im Jahr 1959 Titelbild von Scientific American. Format 50 × 70 cm; Stahlblech ca. 0,5 mm dick, gewölbte Ausführung; DM 69,-/€ 35,28.

KLEINSCHE FLASCHE



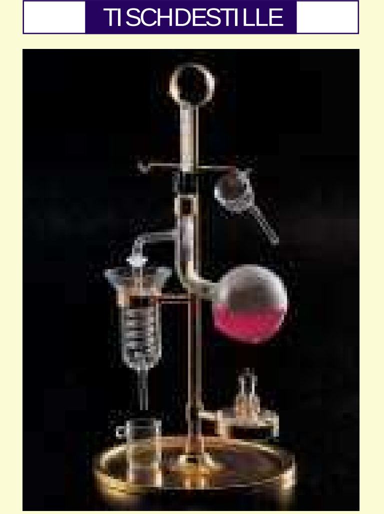
Die nach dem deutschen Mathematiker C. F. Klein benannte Flasche stellt eine Herausforderung an die Glasbläserkunst dar (Höhe 10 cm); DM 109,–/€ 55,73.

REGENSCHIRM „OSIRIS“

Blau und Gold, die Farben des Himmels und der Sonne, galten im antiken Ägypten als göttlich und werden dem Regen Glanz verleihen, Ø 105 cm; DM 59,–/€ 30,17.



TISCHDESTILLE



In kurzer Zeit lässt sich aus Rot- oder Weißwein Weinbrand herstellen. (Für den Hausgebrauch) Größe 37 × 18,5 cm;
DM 298,–/€ 152,36.

PEN ULTIMATE



Der Kugelschreiber schwebt im Ruhezustand, langsam rotierend macht er das Zusammenwirken von Magnetismus und Schwerkraft sichtbar; DM 25,–/€ 12,78.

DESIGNLAMPE



Das Licht bricht sich in den Facetten der schwebenden Kugel und taucht den Raum in ein angenehmes Licht (Höhe 28 cm);
DM 109,–/€ 55,73.

SANDUHR „PARADOX“



Der Sand läuft von unten nach oben und stellt die Zeit auf den Kopf; DM 29,-/€ 14,83.

CD-ROM „DIE ZELLE II“



In der Fortsetzung zur ersten CD-ROM steht hier das Mitochondrium und dessen Stoffwechsel im Blickpunkt der Betrachtung. Neben 3D-Modellen und Computeranimationen zeigen fotografische Aufnahmen die strukturellen und funktionellen Besonderheiten. Videoaufnahmen von lebenden Mitochondrien verdeutlichen die hohe Dynamik dieser Zellorganellen; (Mac und PC kompatibel); DM 69,90/€ 35,74.

BRAINTWISTER

Es ist das gleiche Prinzip wie bei Memory. Aber statt immer gleichen Rückseiten haben die Karten eine zweite Vorderseite: Beim Umdrehen der Karte erscheint wieder eines der insgesamt 10 Motive; DM 39,–/€ 19,94.

BUCHSTÜTZE „EINSTEIN“



Diese Buchstütze lässt Einstein für Ihre Literatur gerade stehen. Die auf 300 Exemplare limitierte Buchstütze ist aus äußerst stabilem Holz gefertigt, mit UV-Schutz versiegelt und steht auf einer Edelstahlplatte. Höhe ca. 20 cm; DM 59,–/€ 30,17.

BRIEFBESCHWERER „ERDE“

Das blau schimmernde, mattierte Glas und die klar herausgearbeiteten Erdteile machen den Briefbeschwerer Erde zu einem dekorativen Stück für jeden Schreibtisch (Ø 7,5 cm); DM 32,–/€ 16,36.

NUSSKNACKER

Mit diesem Design-Nussknacker „Steinschlag“ knacken Sie selbst die härtesten Nüsse. Holzsockel 9 × 9 cm, Höhe 26 cm; DM 84,–/€ 42,95.

ARMBANDUHR „WELLE“



Analog einem Stein, der ins Wasser fällt, erzeugt ein Polystyrolfilm in einem elektrischen Feld eine Welle, die von einem einzigen Punkt ausgeht. Das Ergebnis ist eine selbstorganisierte Säulenstruktur, die dem Zifferblatt einer Uhr ähnelt. Das Motiv dieser neuen Spektrum-Uhr entstammt einem von der DFG geförderten Forschungsprojekt. Armbanduhr „Welle“ mit Edelstahlgehäuse, Lederarmband, nickelfrei, 3 ATM, 1 Jahr Garantie; DM 84,–/€ 42,95.

KUGELSCHREIBER „UFO“



Der schwebende Kugelschreiber bewegt sich zwar bei jeder Erschütterung, aber er fällt nicht um; DM 44,–/€ 22,50.

LAUFROBOTER



Nach dem Zusammenbauen und dem Einsetzen einer Batterie können Sie „Moon-Walker II“ losmarschieren lassen. Sein „elektronisches Gehirn“ ist mit zwei Sensoren ausgestattet, die auf Licht und Geräusche reagieren. Maße 13 × 10 cm; DM 94,–/€ 48,06.

EXPERIMENTIERKASTEN „FUTURE TECHNICS“



Im Zentrum dieses neuen Experimentierkastens von Kosmos steht das große, zusammenbaubare Experimentalhaus, in dem viele Versuche stattfinden, vor allem zum aktuellen Thema der erneuerbaren Energien: Solar-, Wind-, Bio- und chemische Energie.

Mit Geräten zum Selbstbauen: Sonnenofen, Schienenfahrzeug, Segelflugzeug, Akkuladestation.
Der Jugendautor Uwe Wandrey hat alle Experimente ausprobiert und dazu eine spannende Rahmenhandlung geschrieben. Empfohlen ab 12 Jahren.
Inhalt: Modellhaus mit Solaranbau, Solarzellen, Warmwasserkollektor, Klimaraum und Kühlschrank, Solarmotor, Thermometer, Sonnenofen, Ölpresse und weitere Teile;
DM 198,–/€ 101,24.



KOSMOS „BRENNSTOFFZELLE“

Der Experimentierkasten ermöglicht den Bau eines Modellfahrzeuges, das nur mit Hilfe von Wasser und Sonnenenergie fährt (ab 12 Jahren); DM 198,–/€ 101,24.



KOSMOS „KRISTALLE ZÜCHTEN“

Mit dem Experimentierkasten lassen sich bizarre kristalline Formen züchten. Eine Präsentationsbox liefert den passenden Rahmen (ab 14 Jahren); DM 49,90/€ 25,51.

DAS LISTIGE AUGE



Neben verblüffenden Einsichten in das Sehen bietet der Experimentierkasten jede Menge Spiel und Spaß (ab 10 Jahren);
DM 99,–/€ 50,62.

LEGESPIEL „PYTHAGO“

Die 36 kniffligen Aufgaben des Legespiels sind eine Herausforderung an das Auge, die Konzentration und das logische Denkvermögen. „Pythago“ verspricht Spiel- und Rätselspaß für 1-6 Spieler (ab 8 Jahren); DM 58,-/€ 29,65.

ZICKE ZACKE

Bei der Hühnerolympiade steht die Disziplin Federklau auf dem Programm. Dabei versuchen die 2 - 4 mitspielenden „Hühner“, sich gegenseitig zu überholen. Aber nur, wer sich auf dem Hühnerhof auskennt, kommt gut voran. Das Spiel für kleine Kinder ab 4 Jahren trainiert das Gedächtnis. Spieldauer: 10 - 15 Minuten;
DM 59,–/€ 30,17.




GLOBE 4 KIDS

Mit diesem Kinderglobus können künftige Weltenbummler unseren Planeten erforschen. Neben den geografischen Grenzen enthält er über hundert Zeichnungen von Tieren, Monumenten und Sehenswürdigkeiten einzelner Länder und Regionen; DM 54,–/€ 27,61.



MURMELBAHN

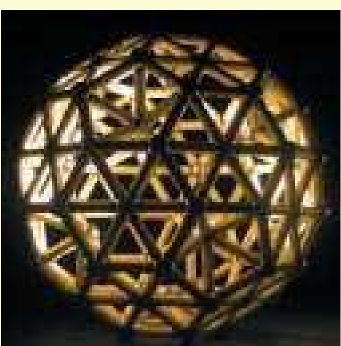


Die verschiedenen Würfel mit vielfältigen Bohrungen und Rinnen ermöglichen die Konstruktion von einfachen bis sehr komplizierten Murmelbahnen. Die richtige Kombination der Würfel ergibt Bahnen, die sowohl auf der Oberfläche der Würfel als auch in Tunneln im Innern derselben verlaufen. Der kleine Baumeister (ab 4 Jahren) bestimmt den Kugellauf ganz allein. Der Standardbaukasten von Cuboro enthält 54 Buchenholzwürfel (Kantenlänge 5 cm) mit 12 verschiedenen Funktionen;
DM 239,–/€ 122,20.

GEOMAG 130



Mit den 90 Stangen (Farbe: Transparent) und 40 Kugeln des Baukastens „Geomag“ lassen sich viele Figuren konstruieren;
DM 110,- /€ 56,24.

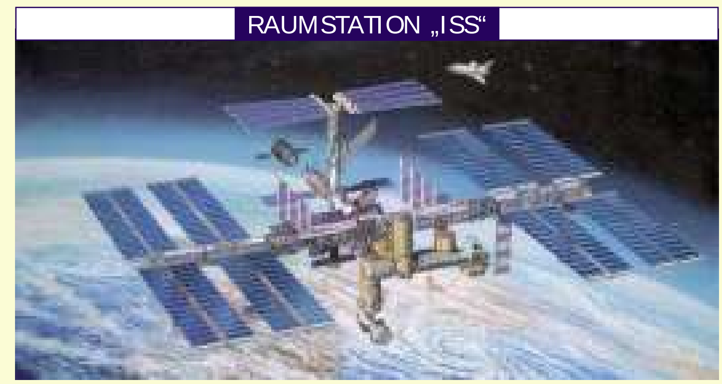




BILDKALENDER „HIMMEL UND ERDE 2002“

Erleben Sie die Sternstunden der Naturbeobachtung – mit dem Bildkalender von Sterne und Weltraum. Die Milchstraße über Namibia, das Sternbild Orion in der Abenddämmerung und farbenprächtige Polarbilder. Amateur- und Fachastronomen präsentieren auf 13 Seiten ihre besten Fotografien. Das Kalendarium bietet Hinweise auf herausragende Himmelsereignisse; Format: 60 × 50 cm; DM 68,- /€ 34,77

RAUMSTATION „ISS“

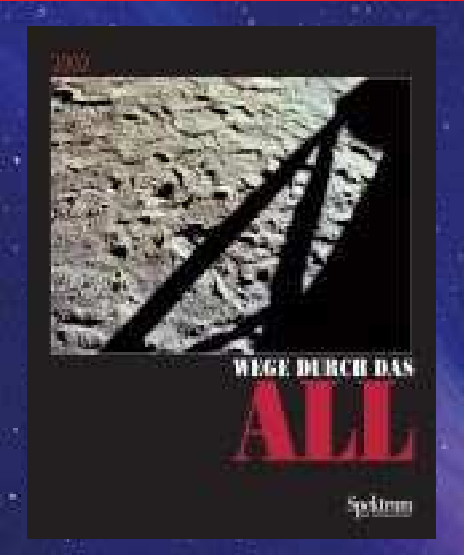


Die Raumstation wird erst in einigen Jahren fertig gestellt sein. Sie können aber schon jetzt aus 183 Einzelteilen im Maßstab 1:144 Ihre eigene Raumstation realisieren (745 mm Länge, 500 mm Spannweite, 406 mm Höhe). Der Modellbaukasten enthält u. a. Aluminium-Vierkantstäbe zur Unterstützung der Konstruktion, Displayständer mit Erdhalbkugel, bewegliche Sonnenpanele, 2 Sojuz-Transportraumschiffe, 3 Roboterarme; DM 69,-/€ 35,28.

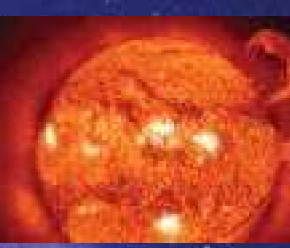
AHNERTS ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2002

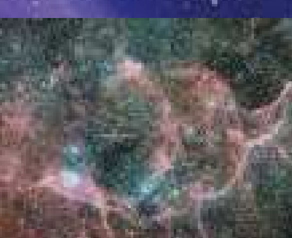
Das Buch bietet umfassende Informationen über das Himmelsgeschehen: die nach Monaten gegliederten Sichtbarkeiten der Sonne, des Mondes, der Planeten, Asteroiden, Kometen, Sternhaufen und Galaxien. Spektakuläre Ereignisse werden besonders ausführlich beschrieben; DM 29,80 /€ 15,24

KALENDER 2002 „WEGE DURCH DAS ALL“



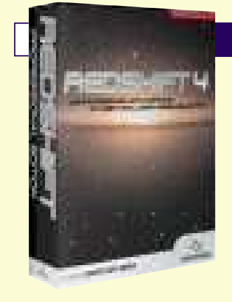






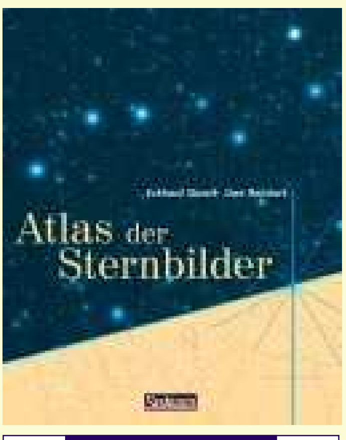
Spektrum der Wissenschaft zeigt Ihnen mit diesem Kalender die ganze Vielfalt von Raumfahrt und Astronomie. Lassen Sie sich einladen zu einer Reise, die Sie ein Jahr lang zu 13 außerirdischen Zielen führt. Die Bilder sind hochglanzveredelt und kommen so auf dem matt-schwarzen Hintergrund gut zur Geltung. Auf einem zusätzlichen Blatt finden Sie zu jedem Motiv detaillierte Informationen.

Format: 48 × 60 cm, Spiralbindung; DM 69,–/€ 35,28



CD-ROM „RED-SHIFT4“

RedShift 4 basiert auf den neuesten Sternenkatalogen, insbesondere auf dem führenden „Tycho2“-Sternenkatalog. Die CD-ROM enthält ein Astronomielexikon und eine Fotogalerie mit spektakulären Aufnahmen; CD-ROM für Win; DM 149,-/€ 76,18.



STERNENATLAS

Die Übersichtsbilder stellen alle 88 Sternbilder des Nord- und Südhimmels dar; 225 Seiten; Hardcover; DM 139,90/€ 71,53

ASTRO-SET AUS KARTON



Mit dem Set lassen sich folgende Modelle nachbauen: Kleiner Sternenhimmel, Sternsonnenuhr, Pendelquadrant, Sonnenuhren 1 + 2, Jakobsstab, Sonnenkompass, Magnetkompass, Sonnensichtbrille, Westentaschen-Teleskop, Kepler-Teleskop, Galileo-Teleskop und Liliput-Klappfernglas. Mitgeliefert wird ein Bastelmesser; DM 46,–/€ 23,52.

ASTRONOMIE

Schmutziger Eros

Bei der Landung auf dem Asteroiden Eros im Februar dieses Jahres funkte die Sonde NEAR-Shoemaker Detailbilder von der Oberfläche des nur 34 mal 13 mal 13 Kilometer messenden Himmelskörpers zur Erde, die einige Rätsel aufwarfen. So ist der Asteroid mit Trümmern übersät, obwohl er wegen seiner winzigen Schwerkraft kleine Objekte nicht festzuhalten vermag: Die Fragmente von Einschlägen anderer Asteroiden sollten ins All davon geflogen sein. Doch nun fanden Peter Thomas und seine Mitarbeiter an der Cornell-Universität in Ithaca (New York) eine Erklärung für die Geröllschicht: Eros ist kein massiver Felsbrocken, sondern ein von Spalten und losen Materialhaufen durchzogenes Agglomerat, das die Energie beim Einschlag anderer Asteroiden in sein Inneres ableiten kann. Auch ein zweites Rätsel scheint jetzt gelöst – die Frage, warum sich am Boden von Kratern feiner Staub angesammelt hat, obwohl es auf Eros weder Atmosphäre noch Wind gibt. Nach Meinung eines Teams um Mark Robinson von der Northwestern University in Evanston (Illinois) könnten winzige Staubpartikel, die von der Sonneneinstrahlung elektrisch aufgeladen wurden, in die Senken „hinabgerieselt“ sein. (*Nature, Bd. 413, S. 369 u. 390*)

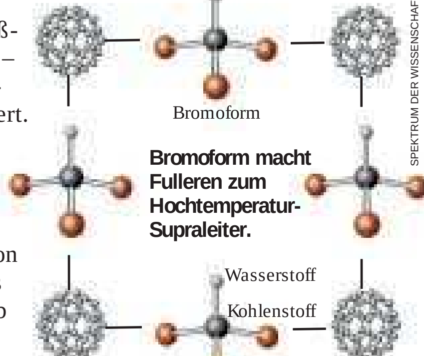

NASA / JHUAPL

Der Asteroid Eros trägt Gesteinsbrocken und Staub auf der Oberfläche.

MATERIALFORSCHUNG

Temperatur-Rekord für Fulleren-Supraleiter

Seit seiner Entdeckung vor fünfzehn Jahren hat der Fußball aus 60 Kohlenstoffatomen – das so genannte Fulleren – Forscher und Öffentlichkeit fasziniert. Allerdings wurden die hoch gesteckten Erwartungen in das Material bisher enttäuscht. So erwiesen sich die kugelrunden Kohlenstoffkäfige bei Zugabe von Kalium oder Rubidium zwar als Supraleiter – aber nur unterhalb einer „Sprungtemperatur“ von –245 °C. Dagegen verlieren Kupferoxide schon ab –140 °C jeden elektrischen Widerstand. Doch nun konnten Physiker um Jan Hendrik Schön von den Bell Laboratorien in Murray Hill (New Jersey) mit einem Trick auch die Sprungtemperatur für Fullerene in die Höhe treiben: Man muss nur die Abstände zwischen den einzelnen Fußballmolekülen im Kristall vergrößern. So wird das Material beim Einbau von sperrigen Chloroform-Molekülen ab –224 °C supraleitend. Und es transportiert sogar schon bei –156 °C elektrischen Strom verlustfrei, wenn man noch voluminösere Bromoform-Moleküle zwischen die Kohlenstoffkäfige zwängt. Gegenüber den Kupferoxiden haben die Fullerene den Vorteil, den Strom nicht nur in einer, sondern in drei Dimensionen zu leiten sowie billiger und leichter formbar zu sein. Vielleicht rechtfertigen sie so doch noch ihren Ruf als Hightech-Material der Zukunft. (*Science, Bd. 293, S. 2410*)



Bromoform macht Fulleren zum Hochtemperatur-Supraleiter.

SATELLITENÜBERWACHUNG

Mehr Öchsle dank Nasa

Ein erfahrener Winzer weiß, dass in seinem Weinberg Weinstock nicht gleich Weinstock ist. So sind die Trauben von Pflanzen mit wenigen Blättern besonders wertvoll, weil sie die meiste Sonne abbekommen. Keltert man diese Früchte getrennt, entsteht besserer Wein, für den sich höhere Preise erzielen lassen. Aber nicht nur Sonneneinstrahlung, auch Bodenbeschaffenheit, Höhenlage und Wasserversorgung beeinflussen die Weinqualität. In Europa kennen die Winzer ihre Lagen seit Jahrhunderten. In Kalifornien hingegen, wo erst seit den 60er Jahren im großen Stil Weinbau betrieben wird, haben sie noch keine vergleichbare Erfahrung. Dafür bekommen sie jetzt Hilfe von oben: Wissenschaftler der Nasa haben eine Methode entwickelt, um von Satelliten und Flugzeugen aus das Chlorophyll der Weinblätter zu messen. In Kombination mit am Boden erfassten Daten zu Blattdichte und Bodenqualität lässt sich so die Qualität der Lagen eines Weinbergs ermitteln und kartieren. Ob derlei Hightech besseren Wein liefert als das Know-how der Winzer, muss sich aber erst noch zeigen. (*Applied Engineering in Agriculture, in Druck*)

Satellitenaufnahme eines Weinbergs im Napa Valley (Kalifornien). Die Blattdichte steigt von Gelb nach Rot.

LEE JOHNSON, AMES RESEARCH CENTER

BOTANIK

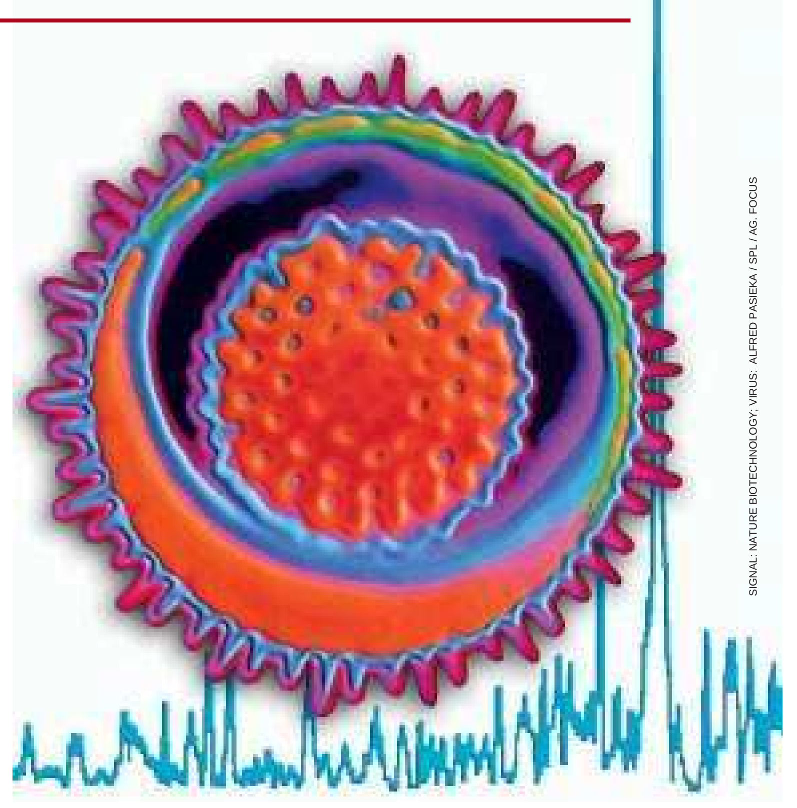
Kampf ums Licht

Wenn eine keimende Pflanze den Kopf aus dem Boden streckt, werden zahlreiche genetische Programme angeworfen: Die Chlorophyll-Synthese springt an, Blätter treiben aus, Stützstrukturen und neue Leitgefäße bilden sich. All das ist im Boden unterdrückt, um Energie und Material zu sparen. Verantwortlich für diese Hemmung zeichnet das Protein Cop1. Es heftet sich an die Moleküle, die „oberirdische Gene“ anschalten und blockiert sie dadurch. Doch wie hebt die Pflanze die Hemmung auf, wenn das erste Licht auf die Spitze des Keimlings trifft? Wie Xing-Wang Deng von der Yale University in New Haven (Connecticut) und seine Mitarbeiter herausfanden, wird Cop1 mit seinen eigenen Waffen geschlagen: Ein anderes lichtempfindliches Molekül – ein so genanntes Kryptochrom – ändert bei der Aufnahme blauer Photonen seine Form. Daraufhin kann es sich an Cop1 anlagern und dieses seinerseits deaktivieren. Interessant ist die Kürze dieses Signalwegs; denn meist verlaufen Genaktivierungen über mehrere Zwischenschritte. Der direkte Weg hat den Vorteil, dass die Pflanze innerhalb weniger Minuten ergrünen kann und so keine Zeit verliert beim Kampf ums Licht.

MEDIZIN

Lauschangriff auf Viren

Bei hoch ansteckenden gefährlichen Seuchen ist es wichtig, erkrankte Patienten oder Tiere rasch zu isolieren und zu behandeln. Doch wenn Viren die Auslöser sind, kann der Nachweis einige Zeit dauern. So brauchten Wissenschaftler bislang bis zu fünf Tage, um den Erreger der Maul- und Klauenseuche aufzuspüren. Nun verspricht ein neuer Biosensor Abhilfe: Statt mit biochemischen Untersuchungen, die langwierig, aufwändig und teuer sind, weisen Forscher um Matthew Cooper von der Universität Cambridge krank machende Viren akustisch nach. Für den Lauschangriff benutzen sie piezoelektrische Quarzkristalle, die beim Anlegen elektrischer Felder ihre Form ändern. Diesen Teilchen verpassen sie einen Mantel aus Antikörpern, die sich spezifisch an die gesuchten Viren binden. Ist die Bindung zu Stande gekommen, werden die Quarzkristalle mit einem elektrischen Wechselfeld in immer heftigere Schwingung versetzt – bis die Viruspartikel abreißen. Dabei entsteht ein charakteristisches Geräusch, das der Kristall wie ein Mikrofon verstärkt. Auf diese Weise lässt sich schon ein einziges Virusteilchen in einem Mikroliter Flüssigkeit aufspüren – ein Tausendstel der Menge, die etwa Aids-Patienten in ihrem Blut haben. (*Nature Biotechnology, Bd. 19, S. 833*)



SIGNAL: NATURE BIOTECHNOLOGY; VIRUS: ALFRED PASIEKA / SPL / AG. FOCUS

Ein akustisches Signal (Kurve) zeigt ein einzelnes Herpes-Virus an.

SPRACHENTWICKLUNG

Brabbeln mit den Händen

Der Rhythmus macht's: Möglicherweise gilt dies auch, wenn Kinder sprechen lernen. Forscher haben jetzt Hinweise darauf gefunden, dass Säuglinge für Taktmuster menschlicher Sprache besonders empfänglich sind. Üblicherweise fangen Babys im Alter von sieben Monaten an zu brabbeln. Doch was ist mit Kindern, die keine gesprochene Sprache hören? Um das herauszufinden, beobachtete ein Forscherteam um Laura Ann Petitto von der Universität Montreal drei Babys gehörloser Paare, die sich nur durch Gebärdensprache verständigten. Es verglich die Handbewegungen dieser Kinder mit denen von drei Säuglingen, die mit normal sprechenden Eltern aufwuchsen. Dabei stellte sich heraus, dass zwar alle Babys ihre Hände schnell und in einem großen Aktionsradius bewegten. Die Kinder gehörloser Eltern zeigten aber zusätzlich eine besondere Art von Gesten. Dabei bewegten sie die Hände deutlich langsamer direkt vor dem Körper – so wie Gehörlose das üblicherweise beim „Gebärden“ tun. Außerdem folgten diese Handbewegungen dem Rhythmus der Gebärdensprache. Demnach brabbelten die Babys taubstummer Eltern offenbar mit ihren Händen. Zum besseren Vergleich wollen die Forscher jetzt den „Sing-Sang“ genauer analysieren, in dem – normale und gehörlose – Eltern mit ihren Babys kommunizieren. (*Nature, Bd. 413, S. 35*)



LAURA ANN PETITTO, DARTMOUTH COLLEGE

Die Gesten dieses Babys von gehörlosen Eltern ähneln der Gebärdensprache.

PHYSIK

Ionen im Gänsemarsch

Bislang geht es Teilchen-Physikern wie einem Jäger, der mit nur zwei Schrotkugeln eine Ente erlegen will: Die Ionenwolken in ihren Beschleuniger-Ringen sind wegen der Wärmebewegung der Teilchen sehr dünn, sodass es nur selten einen Treffer gibt. Dagegen ordnen sich Ionen in ortsfesten „Fallen“ auf kleinem Raum kristallartig an, sofern man sie genügend kühlt. Nun ist es Münchner Forschern um Tobias Schätz gelungen, auch Magnesium-Ionen, die durch einen Ring mit rund zwölf Zentimetern Durchmesser rasen, zu kristallisieren. Der Trick: Ein Laser schubst die langsamen Teilchen an, damit sie schneller werden, während ein entgegengesetzt gerichteter Laser die flotten auf eine Maximalenergie bremst. So sinkt die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Ionen, was einer Kühlung entspricht. Am Ende fliegen alle Teilchen gleich schnell in Reih und Glied, und der Strahl ist scharf gebündelt. Allerdings erreichten die Münchner Forscher in ihrem Minibeschleuniger nur Energien von einem Elektronenvolt, während die Strahlen in großen Anlagen mit millionenfacher Energie umlaufen. Wenn der Trick dort auch funktioniert, bricht eine neue Ära der Teilchen-Jagd an – diesmal mit geballten Schrotladungen. (*Nature, Bd. 412, S. 717*)



TOBIAS SCHÄTZ, UNIVERSITÄT MÜNCHEN

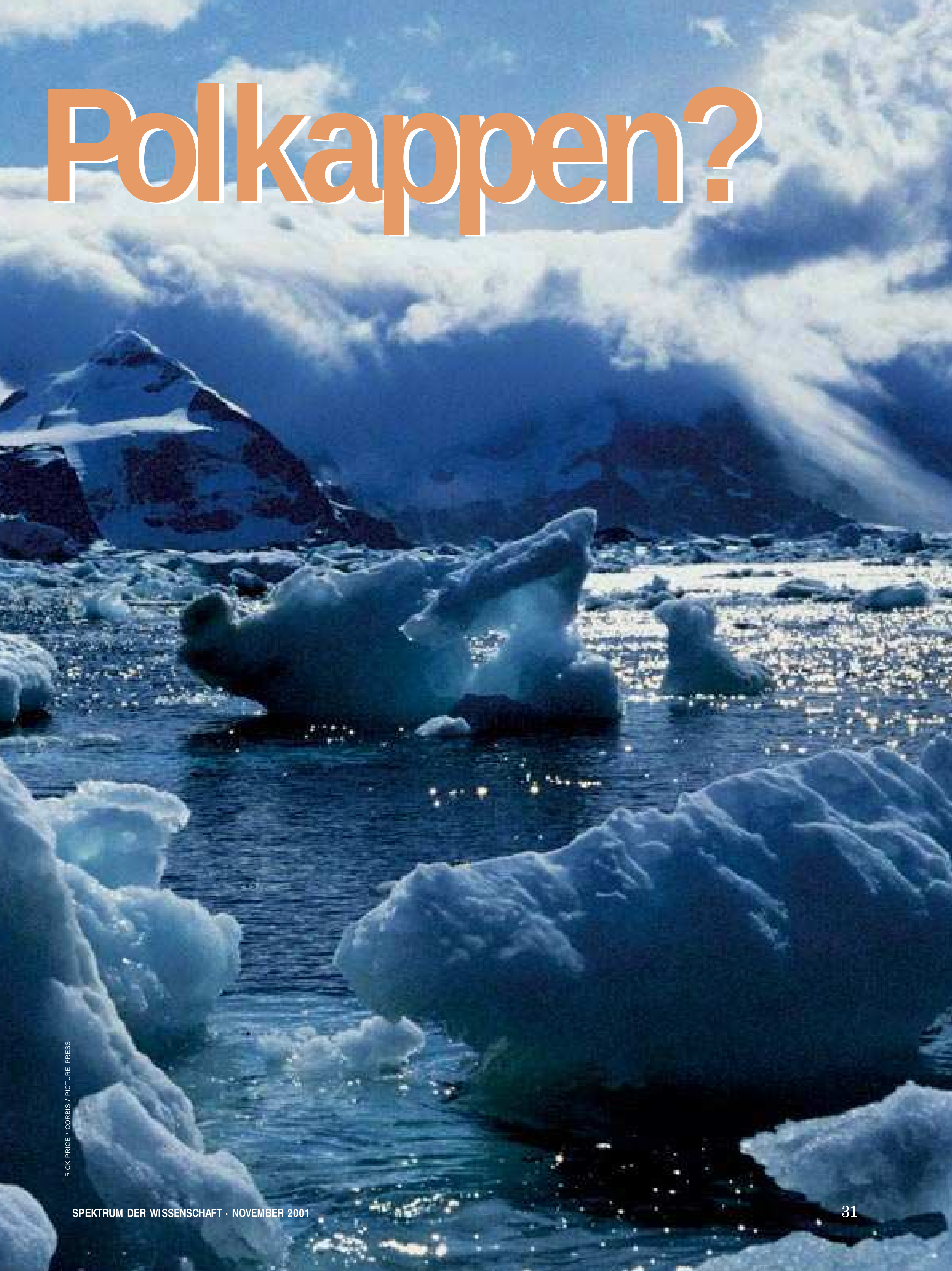
Laserstrahlen (blau) bringen Ionen (rot) im Mini-Beschleuniger „Pallas“ in Reih und Glied.

Schmelzen die



Wenn sich das Eis der Antarktis und Grönlands infolge der globalen Erwärmung in Wasser verwandelt, kommt es zu weltweiten Überflutungen. Doch auf Klimaänderungen reagieren die Polkappen, wie neue Modelle ihrer Eisdynamik zeigen, erst mit mehrtausendjähriger Verspätung.

Polkappen?



RICK PRICE / CORBIS / PICTURE PRESS

Von Frédérique Rémy und Catherine Ritz

Ich bin mitten im Nirgendwo. Es ist bitterkalt: außerhalb meines Zeltes sind es – 40 °C. Die Umgebung ist ebenso großartig wie trostlos. Eine Landschaft aus Eis hebt und senkt sich in endlosen Wellen um mich herum ... Der Himmel ist vollkommen blau, nur hin und wieder entdecke ich ein paar Wolken.“ So schilderte die französische Forscherin Laurence de La Ferrière ihre Eindrücke, als sie im vergangenen Jahr mutterseelenallein per Ski – mit ihrem Versorgungsschlitten im Schlepptau – 2800 Kilometer zwischen dem Südpol und der Küste der Antarktis zurücklegte.

Mit einer Fläche von 14 Millionen Quadratkilometern und einer Eisdecke, die im Mittel 2200 Meter, stellenweise aber mehr als 4000 Meter mächtig ist, beherbergt der Kontinent am Südpol neunzig Prozent des Eises auf der Erde. Würde es komplett schmelzen, stiege der Meeresspiegel um siebzig Meter. Jährlich kommen etwa 2250 Gigatonnen Neuschnee hinzu. Das entsprechende Wasservolumen würde den Meeresspiegel um 6,5 Millimeter anheben oder einen Würfel von 150 Kilometern Kantenlänge füllen.

Die zweite große Inlandeisdecke der Erde befindet sich auf Grönland. Sie speichert zehnmal weniger Eis als die antarktische; dennoch lagern sich wegen des feuchteren und wärmeren Klimas pro Jahr beachtliche 500 Gigatonnen Schnee auf der Insel ab.

Wie reagieren diese beiden riesigen Eisreservoire auf die Erderwärmung der vergangenen Jahrzehnte? Derzeit steigt der mittlere Meerwasserspiegel weltweit um schätzungsweise 1,5 Millimeter pro Jahr. Tragen die Antarktis und Grönland dazu bei?

Modelle der Eisdynamik

Auf der Suche nach konkreten Anhaltspunkten haben Geophysiker damit begonnen, die Dynamik der Polkappen in Computermodellen darzustellen. Dies stößt auf die gleichen Schwierigkeiten wie alle Versuche, komplexe Vorgänge rechnerisch zu erfassen, in die viele verschiedene physikalische Prozesse eingehen. Aber ein weiteres Hindernis kommt hinzu: die sehr unterschiedlichen Zeitskalen für die einzelnen Vorgänge. So folgen gewisse Erscheinungen – wie der Schneefall – unmittelbar den Klimaschwankungen, aber es dauert Tausende von Jahren, ehe eine Temperaturänderung bis zum Felsgrund in ungefähr 3000 Metern Tiefe durchgedrungen ist.

Wegen seines großen Volumens reagiert das Eis der Polkappen sehr träge; derzeit steht es noch unter dem Einfluss von Klimaänderungen, die vor vielen tausend Jahren bereits stattgefunden haben. Andererseits ist es aber auch sehr sensibel; denn jede noch so schwache Klimaschwankung stört das Fließgleichgewicht der Eiskappe und bringt damit gleich beträchtliche Wassermengen ins Spiel. Um die beteiligten Faktoren – wie die Ablagerungsrate von Schnee oder die Größe der Schneeflocken – einschätzen zu können, muss man demnach sowohl die vergangene als auch die gegenwärtige Klimaentwicklung an den Polen kennen.

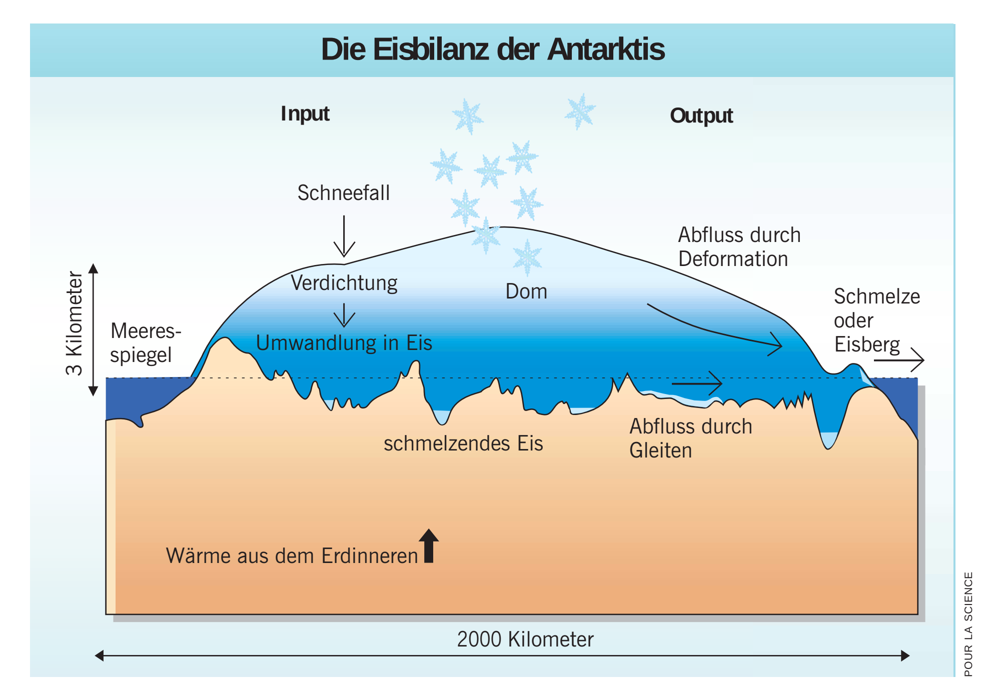
Auch räumlich hat das Modell viele Größenordnungen zu überspannen. So muss es im globalen Rahmen die Folgen der Klimaerwärmung für die Polkappen erfassen, aber ebenso auf der lokalen Ebene zum Beispiel die Dynamik der Schneeablagerung einbeziehen.

Vom Prinzip her ist diese Dynamik einfach: Der heruntergefallene Schnee verdichtet sich, senkt sich nach und nach und verwandelt sich in Eis. Dann fließt er dank der Schwerkraft sehr langsam von dem riesigen, herausgehobenen Plateau (dem Dom) im Zentrum zum Meer (Bild unten). Die Fließgeschwindigkeiten sind im Innern extrem gering, erreichen in den „Sendboten“ genannten Gletschern, die das Eis zum Rand hin abtransportieren, jedoch einige hundert Meter pro Jahr. Dabei variieren sie, anders als noch vor zehn Jahren angenommen, stark von Gebiet zu Gebiet.

In der Antarktis wird das gesamte Eis in Form von Eisbergen abgestoßen, sobald es die Küste erreicht hat. In Grönland erleidet nur die Hälfte dieses Schicksal; der Rest schmilzt am Küstenstreifen, wo die Temperaturen im Sommer über den Gefrierpunkt steigen.

So viel steht jedenfalls fest: Die Polkappen sind keineswegs starre Eismassive. Sie haben eine viele komplexere Dynamik als bisher vermutet. Form und Volumen dieser beiden gigantischen Inlandeisdecken werden durch das Gleichgewicht zwischen Zufluss in Form von Schnee und Abfluss über Eisberge und Eisschmelze bestimmt. Eine Vielzahl von Beobachtungen erlauben inzwischen, diese Phänomene genauer zu beschreiben und zu quantifizieren.

Zwar wurden schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts die ersten automatischen meteorologischen Stationen in den Polarregionen eingerichtet. Das Zeitalter der „modernen“ Beobachtung in Grönland und der Antarktis begann jedoch erst nach dem Ersten Weltkrieg – vor allem dank der aufkommenden Luftfahrt. In den 1950er Jahren begannen Forscher mit systematischen Erkun-



Polkappen unterliegen dynamischen Prozessen. Schnee fällt auf die Oberfläche, verdichtet sich und verwandelt sich in Eis. Da die Inlandeisdecken von Antarktis und Grönland die Form eines abgeflachten Parabolspiegels haben, fließt das Eis durch kriechende Verformung zur Küste ab. Wo es an der Unterseite schmilzt, weil die Temperatur am Felsuntergrund bei 0 °C liegt (wegen der Erwärmung durch die Geothermie), kann es auch gleiten.



Der Schwerkraft folgend, strömen in der Antarktis unablässig kalte Luftmassen vom Gipfel der Eisdecke im Zentrum zur Küste hin. Sie erzeugen „katabatische“ Winde, welche Sturmstärke erreichen können und charakteristische Schneedünen auftürmen: so genannte Sastrugis. Deren Form folgt der Windrichtung.

dungen der Höhenlage und Mächtigkeit des Eises. Da dieses für niederfrequente Radiowellen transparent, für hochfrequente aber undurchlässig ist, wird ein auftreffendes Signal je nach seiner Frequenz an der Eisoberfläche oder an der Grenze zum Gestein reflektiert. Aus der Laufzeit beider Arten von Wellen lässt sich dann sowohl die Dicke des Eises als auch seine Höhenlage ableiten.

Vor etwa fünfzig Jahren gewannen Forscher auch erstmals Messdaten über den Abfluss der Eiskappen, indem sie auf dem Schnee angebrachte Markierungen mit Fixpunkten auf herausragenden Felsen verglichen. Außerdem hoben sie zehn Meter tiefe Schächte aus, um die Temperatur im Boden sowie den vertikalen Temperaturgradienten zu messen. An der russischen Forschungsstation Wostok in der Antarktis schwankt die Oberflächentemperatur zwischen –70 °C im Winter und –50 °C im Sommer. Vermutlich entspricht die Temperatur in zehn Metern Tiefe etwa dem lokalen Jahresmittelwert an der Oberfläche, der wiederum zu den jährlichen Schneefällen proportional ist.

An den Schachtwänden lassen sich die jeweils im Sommer und Winter abgelagerten Schneeschichten abzählen. Dadurch kann man die Schneeakkumulationsrate über einen längeren Zeitraum abschätzen. Die Winterschichten unterscheiden sich von denen des Sommers durch eine feinere Körnung und damit eine größere Dichte.

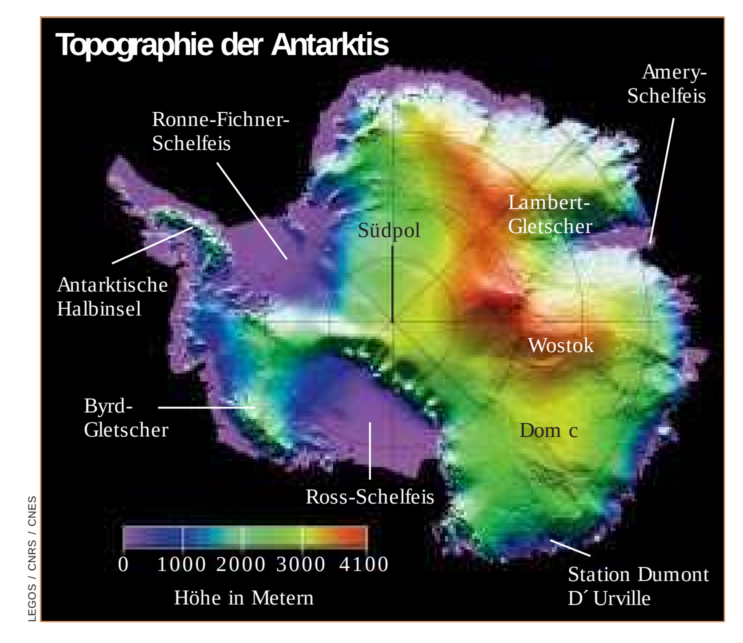
Aufschlüsse durch Tiefbohrungen in die Eisdecke

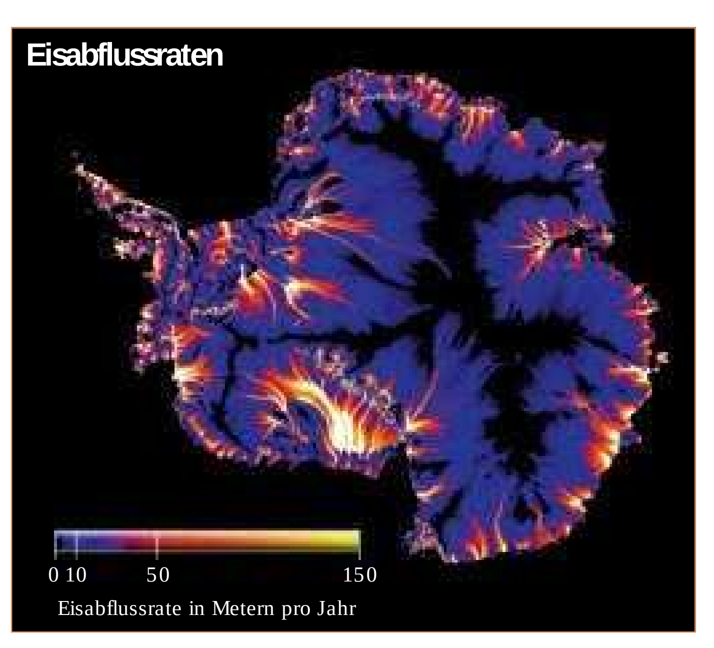
Mitte der 1960er Jahre führten russische Wissenschaftler die ersten Kernbohrungen bis in mehr als 1500 Meter Tiefe durch. Da sich das Eis übereinander schichtet, sinkt sein Alter mit der Tiefe. Bohrkerne liefern also gleichsam Momentaufnahmen der Vergangenheit. Sie zeigen die damaligen Werte für die Temperatur, die Zusammensetzung und den Druck der Luft sowie die Konzentrationen von Verschmutzungen und Aerosolen.

Die einstige Lufttemperatur lässt sich aus dem Verhältnis der Sauerstoff-Isotope in einer Schicht ableiten: Wasser, dessen Sauerstoff-Atom aus dem Isotop der Masse 16 besteht, verdunstet leichter aus den Ozeanen als solches mit dem schwereren Isotop ^{18}O. Dieser Unterschied verstärkt sich mit sinkender Lufttemperatur. Deshalb enthält Schnee, der sich letztlich aus verdunstetem Meerwasser bildet, in kalten Perioden mehr ^{16}O.

Aufschluss über die Zusammensetzung und den Druck der einstigen Luft sowie die enthaltenen Verunreinigungen und Aerosole geben die im Eis eingeschlossenen Luftblasen. Die Bohrung von Wostok hat auf diese Weise 420 000 Jahre Klimageschichte aufgedeckt. Die Bohrkerne bilden somit eine einzigartige Informationsquelle.

Gewisse Probleme bereitet allerdings die Datierung der Proben. Kurz gesagt, schätzt man ihr Alter anhand der Akkumulationsrate von Schnee. Wenn man zum Beispiel annimmt, dass sich in einem Gebiet pro Jahr jeweils eine einen Meter dicke Schneedecke angesammelt hat, ergibt sich für Eis in einer Tiefe von 200 Metern ein Alter von 200 Jahren. Solche Schätzungen sind freilich grob: Sie berücksichtigen nicht, dass die Akkumulationsrate im Laufe der Zeit variiert, das Eis abfließt und so weiter. Aufgrund derartiger Datierungsprobleme wurden die ersten physikalischen Modelle der Eiskappen entwickelt. Heute ▶





Die Topographie der Antarktis wurde vom Satelliten ERS-1 mit einer horizontalen Auflösung von fünf Kilometern bestimmt (links). Die Genauigkeit der Höhenwerte beträgt in den zentralen Gebieten etwa einen Meter. Die Gipfel in der Mitte des Kontinents erreichen 4100 Meter. Anhand dieser Reliefkarte sowie der örtlichen Akkumulationsrate und Dicke des Eises ließen sich die Eisabflussraten berechnen (rechts). Im Zentrum sind sie sehr gering und nehmen zu den Küsten hin unterschiedlich stark zu. Dort grenzen Bereiche, in denen die Abflussgeschwindigkeiten 200 Meter pro Jahr überschreiten, an Zonen, die annähernd lagestabil sind. Große „Sendboten-Gletscher“ wie der Byrd-Gletscher, der in das Ross-Schelfeis mündet, oder der Lambert-Gletscher, der sich in das Amery-Schelfeis ergießt, führen jeweils Tausende von Kubikkilometern Eis pro Jahr ab. Sie sind von rund vierzig Kilometer breiten Rinnen mit erhöhten Abflussraten umgeben.

entnimmt man Bohrkerne in ebenen Gebieten, wo der Abfluss minimal ist.

Die Bedingungen in den unwirtlichen und schwer zugänglichen Polarregionen sind so hart, dass Messungen am Boden notgedrungen punktuell und auf die Küste beschränkt bleiben; das gilt für meteorologische Aufzeichnungen, das Verfolgen von Markierungsbojen, Bohrungen und Ähnliches. Sehr viel bequemer und großflächiger lässt sich dagegen von der Luft aus messen. Satelliten sind deshalb die bevorzugten Beobachtungswerkzeuge der Polarforscher geworden. In den 1960er Jahren startete die amerikanische NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) den Satelliten TIROS (Television Infrared Observation Satellite); mit seinen optischen Messgeräten fotografierte er erstmals zahlreiche unbekannte Gebiete – insbesondere von Eis bedeckte Meere.

Dann folgten die ersten Aufnahmen im Radarbereich. Sie erlaubten, durch Wolken hindurch und auch während der langen Polarnacht zu beobachten. Im Jahre 1991 schickte die Europäische Weltraumorganisation mit ERS-1 einen der ersten Satelliten ins All, der insbesondere für die Polarforschung bestimmt war. Mit seinen Instrumenten konnte er unter anderem die Höhenlage und Dicke des Eises messen sowie Verlagerungen an der Oberfläche registrieren. Von April 1994 bis März 1995 lieferte ERS-1 etwa dreißig Millionen Messwerte, aus denen sich die Topographie der Antarktis-Oberfläche mit einer Auflösung von zwei Kilometern und einer Höhengenauigkeit von rund einem Meter ableiten ließ (Bild oben). Damit lieferten Satelliten-Beobachtungen wertvolle Informationen zur Verbesserung der Modelle für die Polkappen-Dynamik.

Winde, die der Schwerkraft folgen

Als einziger Input geht in diese Modelle die Schneemenge ein, die sich pro Jahr auf der Polkappe ablagert. Sie ist allerdings nicht leicht zu ermitteln. Der Schneefall hängt von komplizierten Vorgängen in der Atmosphäre ab und schwankt stark von Ort zu Ort. Das Wetter der Antarktis wird vom Zirkumpolarstrom beherrscht. Dieser Tiefdruckwirbel führt ständig feuchte Luftmassen und Wolkenfelder um den Südpol. Wenn sie auf den Kontinent treffen und vor den Bergen aufsteigen, kühlen sie sich ab. Dann bilden die Wassermoleküle Eiskristalle, und es schneit. Deshalb gibt es in der schmalen Küstenzone – in Höhenlagen unter 1000 Metern – viel Niederschlag: im Mittel 35 Zentimeter pro Jahr. Im Zentrum hingegen fällt nur wenig Schnee; im Durchschnitt sind es gerade einmal zehn Zentimeter pro Jahr. Die Luft ist hier trockener, und die Wolken kühlen sich nur durch die Kälte ab, die vom Eis ausgeht.

Allerdings sammelt sich nicht der gesamte gefallene Schnee an. In Grönland schmilzt, wie erwähnt, ein Teil in tieferen Lagen während des Sommers. In der Antarktis geschieht das nicht, aber dafür wird der Schnee vom Wind weggefegt. Die –50 °C kalte, dichte Luft fließt hangabwärts und verursacht „katabatische“ Winde: starke, beständige Luftströmungen, die der Schwerkraft folgen. So beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit in der französischen Antarktisstation Dumont d’Urville 40 Kilometer pro Stunde, doch werden manchmal 200 erreicht.

Die starken Winde tragen den Schnee an einzelnen Stellen ab und türmen ihn anderswo zu Dünen auf (Bild auf Seite 33). Diese so genannten Sastrugi können zu falschen Messwerten führen, wenn sie sich etwa innerhalb weniger Stunden rund um eine Messboje bilden. Obwohl die katabatischen Winde für die örtliche Schneeverteilung große Bedeutung haben, blasen sie insgesamt nur einen geringen Teil der Niederschläge ins Meer. Sie begünstigen allerdings auch die Sublimation (Verdunstung) des Schnees, die in gewissen Regionen Hauptgrund für die Erosion der Eisdecke ist.

All diese Effekte versucht man bei der Berechnung des Inputs zu berücksichtigen, doch sie sind schwer zu schätzen. Als weitere Schwierigkeit kommt hinzu, dass auch die Akkumulationsrate an einem bestimmten Ort keineswegs konstant ist, sondern über größere Zeiträume hinweg schwankt. Wie sich zeigt, hängt sie von der mittleren Lufttemperatur an der Oberfläche ab. Nach den Ergebnissen der Bohrungen folgt diese Temperatur den weltweiten Klimazyklen. In der letzten Jahrmillion gab es regelmäßig wiederkehrende Vereisungsperioden (Glaziale), die sich über Zehntausende von Jahren hinzogen. Sie wurden jeweils von kurzen warmen Phasen (Interglazialen) unterbrochen, die im Allgemeinen nur einige tausend Jahre dauerten. Wir leben heute in einer ungewöhnlich langen Warmzeit, die vor ungefähr 10 000 Jahren begonnen hat.

Während der Vereisungsperioden war es an den Polen etwa 10 °C kälter als heute. Gewaltige Eiskappen bedeckten damals Nordamerika (Laurentia) und Eurasien (Fennoskandia) (Bild rechts). Vor 20 000 Jahren, auf dem Höhepunkt der letzten Vereisung, lag der Meeresspiegel mehr als 120 Meter tiefer als momentan.

Die Bohrungen haben auch gezeigt, dass während der Kälteperioden nur halb so viel Schnee fiel wie heute. Das lässt darauf schließen, dass sich die Niederschläge – und damit in etwa auch die Akkumulationsraten – bei einer Abkühlung um 10 °C halbieren. Der Vergleich der Schneemengen in der – kälteren – Mitte des Kontinents und an der – wärmeren – Küste bestätigt diese Faustregel.

Im Prinzip lassen sich die Akkumulationsraten noch auf anderem Wege ableiten. Daten von Radarsatelliten erlauben, die mittlere Korngröße in den obersten Metern der Eisdecke zu bestimmen: Größere Körner schwächen das reflektierte Signal stärker ab. Nun werden die Körner mit der Zeit immer dicker. Findet man also große Exemplare schon in geringen Tiefen, dann hat sich nicht viel Neuschnee darüber abgelagert. Dagegen muss es stark geschneit haben, wenn dicke Körner erst weit unten auftreten. Allerdings ist Abhängigkeit der Korngröße von der Zeit noch nicht genau bekannt. Wir versuchen momentan, eine entsprechende Kennkurve zu erstellen.

Mit Hilfe von Temperaturverteilungskarten und Beobachtungen ist es inzwischen gelungen, Karten der Akkumulationsrate von Schnee auf der Antarktis zu erstellen. Insgesamt schätzt man die pro Jahr auf dem antarktischen Kontinent abgelagerte Schneemenge auf 1800 Gigatonnen. Rund 450 Gigatonnen Schnee sammeln sich zusätzlich auf den drei größten Schelfeisplattformen – schwimmenden Eispanzern, die das antarktische Festland umgeben.

Eis, das unter hohem Druck fließt

Nach dem Input gilt es den Output zu bestimmen, also den Abfluss des Eises. Nachdem der Schnee gefallen ist, verdichtet er sich allmählich und wandelt sich schließlich in Eis um. Diese Umwandlung findet in den ersten hundert Metern unter der Oberfläche statt und dauert einige tausend Jahre. Das ist wenig im Vergleich mit den Zeiträumen, um die es bei den Polkappen geht. Das Eis fließt unter dem Einfluss der Schwerkraft schließlich vom Zentrum des Kontinents zu den Rändern ab.

Anfangs geschieht das durch Deformation wie bei einer zähen Flüssigkeit. Unterwirft man einen Eisklumpen einer plötzlichen, starken Beanspruchung, indem man etwa mit dem Hammer darauf schlägt, zerbricht er. Bei einer langsam einwirkenden, schwachen Beanspruchung – etwa einem leichten stetigen Druck – reagiert er dagegen plastisch und verformt sich. Letzteres gilt für die Polkappen. Die auf sie wirkende Kraft – die Gravitation – ist relativ gering, aber dauerhaft, sodass das Eis nachgibt und zum Meer hin abfließt.

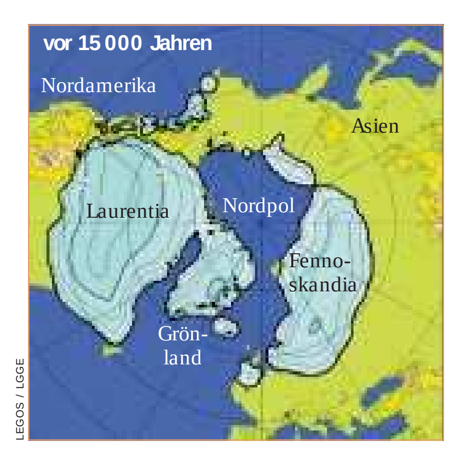
Ein „linearer“ zähflüssiger Körper wie Honig verformt sich proportional zur Beanspruchung. Eis ist jedoch ein nichtlinearer zähflüssiger Körper, bei dem die Viskosität von der einwirkenden Kraft abhängt. Nach dem Glenschen Gesetz sollte die Deformation in diesem Fall proportional zur dritten Potenz der Beanspruchung sein.

In Wirklichkeit ist die Situation jedoch komplizierter. Erstens hängen die Parameter des Glenschen Gesetzes von physikalischen Eigenschaften des Eises ab – etwa davon, wie viele Defekte die einzelnen Eiskristalle enthalten oder wie dicht sie gepackt sind; beides aber variiert mit der Beanspruchung und dem Eistypus. Im oberen Teil der Eisdecke, wo die einwirkende Kraft geringer ist als in der Tiefe, dürfte die Potenz unter drei liegen; erst für das rekristallisierte Eis in Basisnähe gilt vermutlich der Exponent drei.

Zweitens erhöht sich die Plastizität von Eis gemäß dem Arrheniusschen Ge- ▶







Auf dem Höhepunkt der letzten Vereisung vor 15 000 Jahren (oben) umfasste die Antarktis sehr viel mehr flache Küstenregionen (blasslila) als heute (Mitte). Der Grund: Der Meeresspiegel lag damals um mindestens 120 Meter tiefer. Auf der Nordhalbkugel waren die Inlandeisgebiete wesentlich ausgedehnter (unten): Sie bedeckten große Teile Nordamerikas (Laurentia), Europas und Asiens (Fennoskandia). Wegen des niedrigen Meeresspiegels waren einige Gebiete wie die Bering-Straße trocken gefallen. Ein gewaltiges Eismeer bedeckte ganzjährig den Nordpol.

setz exponentiell mit der Temperatur. Bei gleicher Beanspruchung verformt sich Eis am Gefrierpunkt rund 500-mal stärker als bei –50 °C. Nun herrschen an der Polkappe Temperaturunterschiede dieser Größenordnung: An der Oberfläche liegt die Temperatur bei –60 °C und dicht über dem Felsgrund, wo die vom Erdinneren aufsteigende Geothermik das Eis erwärmt, nahe am Gefrierpunkt. Dies ist bei der Berechnung des Abflusses zu berücksichtigen.

Umgekehrt nehmen die Eistemperaturen aber mit der Deformation und folglich mit der Abflussgeschwindigkeit zu (wenn man ein Stück Plastik verdreht, erwärmt es sich). Das ergibt eine positive Rückkopplungsschleife: Bei steigenden Temperaturen fließt das Eis schneller ab, was die Temperatur und damit wiederum die Abflussgeschwindigkeit weiter in die Höhe treibt.

Eisautobahnen mit Einbahnverkehr Richtung Meer

Wenn die Temperatur an der Basis über den Gefrierpunkt steigt, sodass das Eis schmilzt, kommen Gleitvorgänge hinzu. Das beste Beispiel ist der „See“ von Wostok, der größte unter Eis gelegene See der Welt. Er befindet sich in einer Tiefe von ungefähr 3000 Metern und ist mehr als 300 Kilometer lang und 40 Kilometer breit.

Das Eis bewegt sich in Richtung der größten Oberflächenneigung. Diese ist an den Höhenlinien abzulesen. Aus der örtlichen Hangneigung und der sich ablagernden Schneemenge auf dem nächstgelegenen Dom lässt sich der Eisabgang schätzen und unter Berücksichtigung der örtlichen Eisdicke die mittlere Abflussgeschwindigkeit ableiten. Letztes Jahr haben wir dies für die gesamte Antarktis getan und die Ergebnisse in einer Karte zusammengestellt (Bild auf Seite 34).

Die Abflussgeschwindigkeiten variieren demnach deutlich stärker als bisher angenommen. Sie steigen von nicht einmal einem Meter pro Jahr im Zentrum des Kontinents bis auf 100 Meter am Rand. Im Einzelnen hängen sie natürlich vom örtlichen Relief ab. Es gibt Rinnen mit raschem Abfluss, die immer vom Zentrum zum Meer gerichtet sind; dort kann der Strom zehn- oder hundertmal so stark sein wie nur einige hundert Meter entfernt.

Diese „Eisautobahnen“ haben ein beachtliches Fördervolumen: Obwohl sie nur 20 Prozent der Küstenlinie einnehmen, transportieren sie mehr als 80 Prozent des insgesamt ins Meer verfrachteten Eises. Ihre Einzugsgebiete reichen viele hundert Kilometer landeinwärts. Sobald das Eis in Küstennähe gelangt ist, geht es in Form von Eisbergen ab. Diese driften ins offene Meer und schmelzen schließlich.

Je nach dem Verhältnis zwischen Akkumulationsrate und Abflussgeschwindigkeit des Eises ist die Polkappe entweder stationär, wächst oder schmilzt ab. Letzteres prophezeien manche Klimatologen, die per Computer die Konsequenzen der globalen Erwärmung simulieren.

Die Klimamodelle prognostizieren regional unterschiedliche Auswirkungen des Treibhauseffekts, aber für die Pole sagen sie alle einen deutlichen Temperaturanstieg voraus. Dazu scheint das Ergebnis einer wachsenden Zahl von Messungen zu passen, wonach Ausdehnung und Dicke des Eises auf den Meeren rings um die Antarktis abnehmen.

Anderen Untersuchungen zufolge hat sich der Meeresspiegel seit Beginn des 20. Jahrhunderts um 15 Zentimeter erhöht. Ein Drittel dieses Anstiegs ist auf die thermische Ausdehnung des Wassers in den sich erwärmenden Ozeanen zurückzuführen. Ein weiteres Drittel lässt sich dem Abschmelzen von Gletschern in gemäßigten Breiten zuschreiben. Der Ursprung des letzten Drittels ist unbekannt. Stammt dieses Wasser von den Polkappen?

Die Erwärmung um 0,6 °C, die in der Antarktis seit Beginn des 20. Jahrhunderts beobachtet wurde, hat die Niederschläge um drei bis fünf Prozent steigen lassen. Diese gehen als Schnee nieder, der bei den herrschenden tiefen Temperaturen nicht schmilzt, sondern sich in Eis verwandelt. Als Folge davon sollte sich der Meeresspiegel um 0,2 Millimeter pro Jahr senken.

In Grönland ist die Situation etwas anders. Auch hier lässt die momentane Erwärmung die Eismassen im Zentrum wachsen; doch dafür schrumpfen sie an den Küsten, weil das Eis dort schmilzt. Insgesamt gesehen verändert Grönlands Eisschild also seine Form, ohne jedoch nennenswert zur Schwankung des Meeresspiegels beizutragen.

Generell gilt, dass sich eine Temperaturschwankung erst nach Tausenden von Jahren voll auswirkt. So machen die Polkappen im Moment noch die Folgen des Übergangs zur jetzigen Warmzeit durch, der vor 10 000 Jahren stattfand. Die starke Schneeansammlung im Zentrum beruht zwar auf den aktuellen „hohen“ Temperaturen. Doch spiegeln die Abflussgeschwindigkeiten der tieferen Schichten noch die Temperatur der letzten Vereisungsperiode wider und sind daher relativ gering. Der Schnee sammelt sich folglich schneller an als er abfließt, und das Zentrum wird immer dicker.

Das Rätsel des fehlenden Wassers

Die Abflussgeschwindigkeit des Eises in der Antarktis hängt aber auch vom Meeresspiegel ab. Sobald das Inlandeis die Küste erreicht, gilt: Wenn es dick genug und der Ozean flach ist, sitzt es zunächst weiter auf dem Untergrund auf und rückt entsprechend langsam vor; andernfalls schwimmt es auf und bildet Treibeisflächen. Solches Schelfeis bedeckt in der Antarktis die drei größten Buchten (Ross, Fichner-Ronne und Amery). Es spielt eine wichtige Rolle für die Polkappen, denn es begrenzt den Eisabfluss vom Inland her.

Wenn der Meeresspiegel sinkt, setzen sich die Schelfeisflächen auf den Grund. Da sie dann wegen der Reibung mit dem Boden langsamer abfließen, wird die Eiskalotte dicker. Umgekehrt löst sich das auf dem Sockel sitzende Eis vom Grund, wenn der Meeresspiegel steigt: Die Treibeisgebiete dehnen sich aus, und der Eisabfluss beschleunigt sich. Da außerdem relativ warmes Meerwasser unter das neu entstandene Schelfeis dringt, kann dieses von unten her schmelzen, was den Eisabfluss vom Kontinent zusätzlich verstärkt. Heute

Literaturhinweise

Topographie des calottes polaires par altimétrie satellite. Von F. Rémy, L. Testut und B. Legresy in: Comptes rendus de l'Academie des Sciences, Nr. 333, S. 457 (2000).

Climate and Atmospheric History of the Past 420000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica. Von J. R. Petit et al. in: Nature, Bd. 399, S. 429 (1999).

Sensitivity of a Greenland Ice Sheet Model to Ice Flow and Ablation Parameters: Consequences on the Evolution Through the Last Climatic Cycle. Von C. Ritz, A. Fabre und A. Letréguilly in: Climate Dynamics, Bd. 13, S. 11 (1997).



Frédérique Rémy *(links) ist Forschungsdirektorin am Laboratorium für Weltraum-Geophysik und -Ozeanographie in Toulouse.*
Catherine Ritz *hat einen Forschungsauftrag am Laboratorium für Umweltglaziologie und -geophysik in Grenoble.*

Satelliten verfolgen die Wanderung der Antarktis-Gletscher

Der Lambert-Gletscher ist einer der größten seiner Art weltweit. Er ergießt sich in das Amery-Schelfeis, eine schwimmende Eisplattform am Rande der Antarktis. Seine bis zu 80 Kilometer breiten Zuflüsse, „Fischer“ und „Mellor“, sind ebenfalls Eisautobahnen. Der europäische Satellit ERS-1 hat von solchen Gletschern, die meist Tälern im Gesteinsuntergrund folgen, gleichsam bewegte Bilder geliefert, aus denen die Fließgeschwindigkeit des Eises hervorgeht.

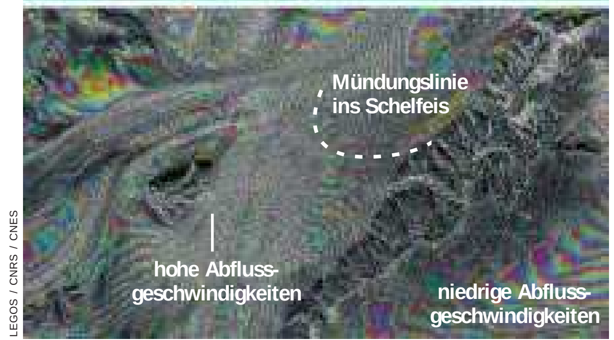
Das an Bord des Satelliten installierte Radargerät sendet einen Mikrowellen-Strahlungspuls zum Gletscher und misst, wie viel davon nach welcher Zeit zurückkehrt. Vereinfacht ausgedrückt, gibt die Intensität der Reflexion Aufschluss über die Struktur und Neigung der Eisoberfläche, während die Laufzeit die Höhenlage anzeigt. Per Computer lassen sich die Radarechos zu einem Bild verarbeiten (oben).

Um auch die Abflussgeschwindigkeiten zu ermitteln, muss man denselben Gletscher aus demselben Blickwinkel in gewissen Abständen – etwa alle 24 Stunden – immer wieder aufnehmen. Bei unveränderter Oberfläche des Gletschers müssten die Bilder identisch sein. In Wirklichkeit fließt das Eis aber, und seine Oberfläche verändert sich. Die Laufzeit der Radarpulse variiert für jeden Punkt der Gletscheroberfläche daher von Tag zu Tag; nur auf herausragenden Felsen bleibt sie gleich. Überlagert man die Aufnahmen, die zu verschiedenen Zeiten gemacht wurden, entsteht ein so genanntes Interferogramm (unten). Es zeigt die Laufzeitdifferenzen für jeden Messpunkt in Form von Hell-Dunkel-Streifen, die man üblicherweise als Regenbogen farbcodiert, um sie besser sichtbar zu machen. Die Verlagerung eines Punktes zwischen zwei Aufnahmen lässt sich dann einfach durch Abzählen der Streifen bestimmen. Jeder entspricht einer Ortsveränderung von 28 Millimetern (der Wellenlänge der verwendeten Radarstrahlung). Je näher die Streifen aneinander liegen, umso größer ist die Verlagerung und damit die Fließgeschwindigkeit.

Mit der Radarinterferometrie lässt sich auch auf einfache Weise der Übergang zum Schelfeis (punktiert) ermitteln, das nicht mehr dem Felsuntergrund aufsitzt, sondern auf dem Ozean schwimmt. Dadurch hebt und senkt es sich im Rhythmus der Gezeiten, was sich klar in den Laufzeitdifferenzen der Radarpulse zwischen verschiedenen Aufnahmen widerspiegelt. Für das einige hundert Meter dicke Amery-Schelfeis beträgt der Tidenhub etwa 1,5 Meter. Die Mündungslinie der Eiskalotte stellt einen guten Indikator für Klimaschwankungen dar: Wenn aufgrund einer globalen Erwärmung der mittlere Meeresspiegel ansteigt, weicht sie in Richtung Festland zurück, und die Eiskappe schrumpft. Die Glaziologen beobachten die Verlagerungen dieser Linie deshalb mit Argusaugen, um so die Dynamik der Eiskalotten zu verfolgen.

Benoît Legresy

Der Autor forscht am Labor für Studien der Weltraum-Geophysik und -Ozeanographie in Toulouse.



Eine einzelne Radar-Aufnahme des Satelliten ERS 1 zeigt das Relief des Lambert-Gletschers (oben). Aus zwei im Abstand von einem Tag aufgenommenen Bildern lässt sich ein Interferogramm erzeugen, das hier mit Regenbogenstreifen farbcodiert ist (unten). Die Dichte der Streifen ist proportional zur Abflussgeschwindigkeit des Gletschers; diese erreicht mehr als 600 Meter pro Jahr. Das Eis neben dem Gletscher bewegt sich nur um einige Meter pro Jahr.

sind sich die Glaziologen weitgehend darin einig, dass Schwankungen des Meeresspiegels das Volumen der Inlandeisdecke auf der Antarktis beeinflussen – allerdings mit Zeitverzögerungen von vielen tausend Jahren.

Alle Satellitenmessungen bestätigen die geschilderten Effekte. In Grönland erhöht sich die Eisdecke im Zentrum wegen vermehrter Schneefälle um zehn Zentimeter pro Jahr, während sie sich an den Rändern – durch beschleunigtes Schmelzen – um den gleichen Betrag ausdünnt. Die aktuelle Erwärmung beherrscht also die Eisdynamik auf der Insel, trägt aber nicht zum Anstieg des Meeresspiegels bei. Was die Antarktis betrifft, so scheint sich die Fließgeschwindigkeit der Gletscher im Landesinneren zu beschleunigen. Doch der Effekt dürfte mäßig bleiben. Außerdem beruht er noch auf der Erwärmung nach dem Ende der letzten Eiszeit, nicht auf derjenigen, die wir heute erleben.

Im Moment liefern weder die Modelle noch die Satellitenbeobachtungen Hinweise darauf, dass die Polkappen zum Anstieg des Meeresspiegels beitragen. Diese Feststellung ist in gewisser Weise beruhigend, aber auch unbefriedigend; denn damit bleibt ein Drittel des geschätzten Meeresspiegelanstiegs ungeklärt. Woher kommt das „fehlende“ Wasser? Diese Frage beschäftigt Klimatologen, Ozeanographen und Glaziologen. Wie immer die Antwort lauten wird: Die Polkappen scheinen es nicht zu liefern. Nach den neuesten Abschätzungen und Modellierungen zeigen sie sich zwar unerwartet dynamisch, doch für ein Schwinden gibt es keinerlei Anhaltspunkte.

Menschenfresser



GROSSES BILD: DAVID BRILL; KLEINES BILD: AKG BERLIN

Anthropologen entdecken immer mehr Belege für menschlichen Kannibalismus – bei frühen Europäern und den Neandertalern ebenso wie bei prähistorischen hoch stehenden Völkern Amerikas.



Dieser frühe Neandertaler fiel vor etwa 130 000 Jahren allen Anzeichen nach Kannibalismus zum Opfer. Die Teile seines zertrümmerten Schädels lagen in der Krapina-Höhle in Kroatien. Die Menschenfresser-Szene unten links stammt aus einem brasilianischen Reisebericht aus dem späten 16. Jahrhundert.

in der Altsteinzeit

Von Tim D. White

Spätestens seit Herodot kursieren Geschichten über Menschen fressende Völker. Der griechische Gelehrte, der aus allen Ländern Wissenswertes zusammentragen ließ, schrieb solche Berichte vor über 2400 Jahren aber wohl als Erster nieder. Weltreisende, Missionare und Soldaten lieferten noch in den letzten Jahrhunderten immer wieder Horrormeldungen über kannibalische Bräuche bei Völkern in fernen Ländern.

Waren dies nur Ausgeburten sensationslüsterner Fantasten? Oder praktizierten einige Naturvölker tatsächlich Kannibalismus? Dichtung und Wahrheit ließen sich bei der dubiosen Quellenlage nur schwer unterscheiden.

Für noch mehr Aufruhr sorgten im neunzehnten Jahrhundert Spekulationen darüber, dass auch unsere Vorfahren Menschenfresser gewesen sein könnten. Archäologische und ▶



Zertrümmern und Zermalmen

Die Anasazi verwerteten alle nahrhaften Teile ihrer menschlichen Opfer – so, wie sie Tiere zubereiteten. Das zeigen hier und auf den folgenden Bildern Menschenknochen vom Macos Canyon in Colorado. Bei diesen Knochen aus dem Mittelfuß wurden die Enden zerknackt, um das in dem porösen Gewebe enthaltene Fett zu gewinnen.

TIM D. WHITE

anthropologische Funde in Europa und in anderen Erdteilen erregten diesen Verdacht. Seither streiten die Wissenschaftler hierüber. Erst in jüngerer Zeit gelang es mit genaueren Untersuchungen, die Zusammenhänge soweit zu klären, dass viele Forscher nun nicht mehr daran zweifeln: Unter den Neandertalern und bei noch früheren Menschen in Europa muss es Kannibalismus gegeben haben.

Inzwischen gilt auch als so gut wie sicher, dass einige prähistorische Völker noch im vergangenen Jahrtausend kannibalisch waren. Hiervon zeugen charakteristische Spuren auf Tausenden von Knochenfossilien, die an den verschiedensten Orten gefunden wurden – von den pazifischen Inseln bis zu den prähistorischen Pueblos im Südwesten Nordamerikas.

Seit Jahrzehnten bemühen sich Anthropologen, verschiedene entsprechende Verhaltenserscheinungen, allgemein „Anthropophagie“ genannt, einzuordnen. Denn unter Kannibalismus könnte man genau genommen sehr verschiedenartiges Verhalten verstehen. Einige Wissenschaftler klassifizieren das Phänomen nach der Beziehung der Täter zu ihren Opfern. Sie sprechen von „Endokannibalismus“, wenn Menschen Gruppenangehörige oder deren Körperteile essen, von „Exokannibalismus“, wenn sie Außenstehende und Fremde verspeisen, und von „Autokannibalismus“, wenn es sich um Teile des eigenen Körpers handelt. Hierunter fällt alles vom Fingernägel-Kauen bis zum, etwa bei Folter, erzwungenen Verzehr eigener Körperteile.

Daneben unterscheiden Forscher Kannibalismusformen je nach dem zu Grunde liegenden Antrieb der Menschen. So sind Fälle von „Überlebenskannibalismus“ als Verzweiflungstat aus Hunger dokumentiert. Dies trat etwa bei in der Eiswüste gefangenen Teilnehmern von Polarexpeditionen auf und auch bei den Verunglückten eines Flugzeugabsturzes, die vor einigen Jahren in den Anden in der Ödnis überlebten. Auch die Pioniere der „Donner Party“, die während des harten Winters 1846/47 in der Sierra Nevada im Schnee eingeschlossen waren, verzehrten Menschenfleisch.

Davon zu trennen ist der „rituelle Kannibalismus“: Die Familie oder Gemeinschaft verzehrt ihre Toten im Rahmen von Bestattungsriten, um sich deren Lebensenergie einzuverleiben oder um ihr Andenken zu ehren. Wieder etwas anderes ist der „pathologische Kannibalismus“. Damit gemeint sind Verhaltensgestörte und Kriminelle, die Leichen essen. In dem Fall handelt es sich allerdings vorwiegend um fiktive Gestalten – wie die Figur Hannibal Lecter in dem Thriller „Das Schweigen der Lämmer“.

In diesem Artikel behandle ich nur den kulturell geprägten regelmäßigen Verzehr von Menschenfleisch, also die Erscheinung, die Reisende und Abenteurer noch Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts von exotischen Völkern beschrieben und die Fachleute auch als „gastronomischen“ oder „kulinarischen“ Kannibalismus bezeichnen. Ob es dergleichen wirklich gab, darüber stritten die Forscher stets sehr heftig. Denn an den Kontakten zu den fremden Kulturen nahmen qualifizierte Völkerkundler und Anthropologen erst seit dem späten neunzehnten Jahrhundert teil. Sie kamen höchstens noch mit den letzten Überbleibseln solcher Bräuche in Berührung.

Im zwanzigsten Jahrhundert hielten viele Experten die Berichte von Menschenfressern denn auch für erfunden. Zu ihnen gehörte der Anthropologe Ashley Montagu. Er behauptete 1937, Geschichten von Kannibalen seien reine Abenteuermärchen.

William Arens von der State University von New York in Stony Brook ging sogar noch weiter. Der Anthropologe zerpflückte die vielen Berichte über Menschenfresser in seinem 1979 erschienenen Buch „The Man-Eating Myth“. Dabei kam er zu dem Schluss, die Darstellungen seien entweder unzutreffend oder ungenügend dokumentiert, egal ob von den Azteken, den Maori oder den Zulu. Zwar ließen andere Fachleute diese generelle Absage an den Kannibalismus nicht gelten. Doch William Arens verwies zu Recht auf die mangelhafte Methodik und unkritische Behandlung des Themas durch die Wissenschaftler. Sonst würden Anthropologen wesentlich genauer vorgehen, nämlich scharfe Standards vorgeben und ihren Verstand walten lassen. Bei diesem Thema hätten sie aber, so Arens, nur unkritisch die Vorstellungen und kaum versteckten Vorurteile ihrer eigenen Kultur gegenüber Primitiven untermauert.

Kannibalismus kann unter sehr verschiedenen Begleitumständen auftreten

Tatsächlich hatten sich die so angegriffenen Anthropologen des neunzehnten und beginnenden zwanzigsten Jahrhunderts nicht nur auf zeitgenössische Völker beschränkt, einige hatten das Menschenfressertum auch in die Vorzeit projiziert. Wildeste Spekulationen ka-

men auf: So mancher prähistorische archäologische Fund in Europa oder andernorts sollte nach Ansicht dieser Forscher auf Kannibalen hindeuten. Der amerikanische Schriftsteller Mark Twain mokierte sich hierüber schon 1871, wenn auch mit einem Augenzwinkern.

Einige Archäologen und Anthropologen des zwanzigsten Jahrhunderts gingen noch weiter zurück. Sie hielten nicht nur die Neandertaler, sondern schon die ersten Vor- und Frühmenschen für Kannibalen – etwa den afrikanischen frühen Hominiden *Australopithecus africanus* und den *Homo erectus*, der als Erster nach Eurasien vordrang. Nach Ansicht einiger Wissenschaftler begleitete Kannibalismus die menschliche Evolution seit drei Millionen Jahren.

Viele frühe Berichte von Menschenfressern waren ungenügend dokumentiert

Die teils vorschnellen, ungenügend belegten Aussagen mancher Kollegen griff der Archäologe Lewis Binford Anfang der achtziger Jahre in seinem Buch „Bones: Ancient Men and Modern Myths" an. Darin fasste er Argumente zusammen, warum die angeblichen Hinweise auf Kannibalismus in der Altsteinzeit nicht stichhaltig wären. Er berief sich auf Untersuchungen anderer Prähistoriker über Knochenfunde aus der Vorzeit. Diese Experten hatten sich damit befasst, welche Schlüsse man aus Fossilien, ihrer Anordnung und Zusammensetzung und dem Fundzusammenhang ziehen darf und welche nicht. Unter anderem hatten sie erarbeitet, was manche Spuren an Knochen wirklich besagen und woran man Einwirkungen bestimmter Art durch den Menschen erkennt. Binford verlangte, Hypothesen experimentell zu überprüfen und auch gegenwärtige Verhaltenserscheinungen hinzuzuziehen, etwa bestimmte Begräbnisriten zu erwägen. Er forderte nicht nur wesentlich mehr wissenschaftliche Sorgfalt bei der Deutung verdächtiger Funde, sondern auch eine präzise, konsistente Methodik. Auf die weiteren Forschungen über menschlichen Kannibalismus hatte Binfords Abhandlung großen Einfluss.

Wie aber sollen Wissenschaftler heute erkennen, ob ein früheres Volk oder eine steinzeitliche Gemeinschaft Menschen verzehrte? Da menschlicher Kannibalismus heute praktisch nicht mehr existiert, können wir in der Gegenwart nicht direkt beobachten, welche Spuren solche Verhaltensweisen zurückließen. Darum ist die Hilfe von Wissenschaften gefragt, die sich von Haus aus mit der Vergangenheit befassen. Besonders die Archäologie ist unverzichtbar, um klären zu helfen, ob und in welchem Ausmaß Kannibalismus einst vorkam.

Die Interpretation von auffälligen Spuren wird allerdings dadurch erschwert, dass Menschen erstaunlich vielfältige Wege gefunden haben, sich ihrer Toten zu entledigen. Noch in unserer Zeit werden die Verstorbenen in manchen Kulturen beerdigt, in anderen verbrannt. An einigen Orten, etwa in Indien, ist es üblich, die Leiche auf einem Gerüst festzubinden, an anderen, sie dem Meer oder einem Fluss zu übergeben, in einen hohlen Baum zu zwängen oder sie wilden Tieren zu überlassen. Auch mit den Skeletten gingen die Völker in verschiedenster Weise um. Viele gruben die Knochen wieder aus, wuschen und bemalten sie und vergruben sie dann bündelweise, oder sie streuten sie auf Steinen aus. Manche solcher Bräuche existieren heute noch. In einigen Gegenden Tibets würden zukünftige Archäologen die heutigen Bestattungsriten kaum nachträglich aus Fossilien erschließen können. Denn diese Menschen zerteilen die Leichen meistens und überlassen sie dann Geiern und anderen Aasfressern. Übrig gebliebene Knochen sammeln sie ein, zermahlen sie fein und mischen das Pulver mit Mehl und Getreidekörnern. Dies verfüttern sie wiederum an Vögel.

Angesichts solcher Schwierigkeiten, Kannibalismus in der Vergangenheit unumstößlich nachzuweisen und von bestimmten Bestattungspraktiken zu unterscheiden, legen Wissenschaftler an ihre Interpretationen heute sehr strenge Kriterien an. Als zweifelsfreier Beleg genügt es ihnen beispielsweise nicht, wenn menschliche Knochen etwa Schnitte, Kratzer oder Bruchstellen aufweisen, die nur bei der Bearbeitung mit einem Werkzeug entstanden sein können: als sei Fleisch abgeschnitten oder der Knochen zerschlagen worden. Auch Brandspuren bestimmter Art erhärten zwar den Ver- ▶



TIM D. WHITE

Hacken und Schneiden

Dieses Schienbein trägt mehrere Einkerbungen von einem scharfen Werkzeug. Sie entstanden, als jemand Fleisch und Sehnen abtrennte. Manche Knochen weisen feinere Einschnitte von Messern auf. Mit Hack- und Schneidgeräten trennten die Anasazi auch Köpfe ab.



Braten und Rösten

Diese Schädelstücke weisen an den dunklen und kaputten Stellen Brandspuren auf. Es handelt sich um Fragmente vom Schädelrand hinter dem Ohr. Dort liegt über dem Knochen nur eine dünne Gewebeschicht, weswegen Schädel an dieser Stelle beim Grillen besonders leicht ansengten und teilweise verbrannten.

TIM D. WHITE

dacht auf Zubereitung für eine Mahlzeit, dies reicht aber als Zeugnis nicht aus. Dafür müssen weitere Begleitumstände hinzukommen. So verlangen die Anthropologen unterstützende Hinweise aus dem Umfeld des Fundes. Wenn im selben Zusammenhang Tierknochen auftauchen, die ähnliche Bearbeitungsspuren tragen und auch in gleicher Weise deponiert sind wie die Menschenknochen, und wenn aus dem Gesamtzusammenhang klar hervorgeht, dass diese Tiere von Menschen als Mahlzeit zubereitet wurden, gilt dies als starkes Indiz dafür, dass hier auch Menschen verspeist wurden.

Tierfossilien vom selben Fundort bei den Analysen zum Vergleich hinzuzuziehen, forderten Archäologen schon lange. Denn, so ihr Argument, an den Beschädigungen solcher Knochen und der Weise, wie sie liegen, lasse sich eindeutig ablesen, ob diese Tiere geschlachtet wurden und ein Mahl stattfand. Wenn alle Umstände für die Menschenknochen genau die gleichen sind, spricht dies recht deutlich für kannibalische Praktiken.

Auch Raubtiere beschädigen Knochen, wenn sie ein Tier – oder einen Menschen – fressen. Doch ihre Zähne hinterlassen andere Spuren als Werkzeuge. Man kann unterscheiden, ob ein Raubtiergebiss das Fleisch vom Knochen abtrennte oder ob ein Steingerät es absäbelte und abschabte. Es sieht anders aus, wenn ein starker Kiefer den Knochen zerbiss, zerbrach oder zermalmte, oder wenn jemand mit einem Stein den Schädel aufschlug oder einen Röhrenknochen öffnete, um an das Gehirn oder das Knochenmark zu gelangen.

Um Kannibalismus nachzuweisen, muss man vor allem genau rekonstruieren, wie die menschlichen Knochen beschädigt wurden – ob und welche Spuren von scharfen Klingen oder von Hämmern sie tragen, ob und in welcher Weise sie zerbrochen wurden oder mit Feuer in Berührung kamen – und was von ihnen danach übrig blieb, welche Knochen und welche Teile davon. Allerdings könnten manche Schnitt- und Schlagspuren für sich allein zum Beispiel auch besagen, dass jemand in einen Kampf mit Waffen verwickelt war. So können Skelette von Kriegsopfern früherer Jahrhunderte Kerben tragen, die von Schwertern oder Säbeln stammen. Ein anderes Beispiel, das spätere Generationen von Forschern irreführen könnte, sind die von Medizinstudenten sezierten Leichen, deren Skelette möglicherweise auch Einschnitte erhalten. Aus diesem Grund ist es so wichtig, auch den Fundkontext genauestens zu beachten.

Zwangsläufig wird man bei so strengen methodischen Kriterien die meisten Fälle von tatsächlichem Kannibalismus übersehen und selbst im Verdachtsfall nicht als solchen deuten dürfen. Dass etwa die Papuas von Neu-Guinea kannibalische Bräuche pflegten, haben Völkerkundler zweifelsfrei dokumentiert. Anhand von Knochenresten und den Fundumständen könnten Anthropologen dieses Verhalten nachträglich jedoch nicht überzeugend belegen. Die Papuas säuberten die Köpfe von Verstorbenen vorsichtig von Haut und Fleisch und holten das Gehirn heraus. Die fast unversehrten Schädel ließen sie trocknen. Da sie diese später oft weiter benutzten, wirkten die Griffstellen bald wie poliert. Manchmal bemalten sie Köpfe und pflanzten sie auf Pfähle, um sie zur Schau zu stellen oder zu verehren.

Tierknochenreste von Mahlzeiten am selben Ort verstärken den Verdacht

Alle weichen Teile, auch das Gehirn, verspeisten die Papuas gleich zu Beginn. Fraglos praktizierten sie einen rituellen Kannibalismus. Auch wenn dieses Beispiel zeigt, dass strenge wissenschaftliche Kriterien irreleiten können, befürworten meine Kollegen und ich die methodischen Maßgaben. Zumindest bewegen wir uns damit auf der sicheren Seite. Letztlich vermochten wir sogar mit den scharfen Kriterien festzustellen, dass einige Menschengruppen in früheren Zeiten Kannibalen gewesen sein müssen.

Die klarsten archäologischen Hinweise stammen von den Anasazi, den prähistorischen Pueblo-Indianern im südwestlichen Nordamerika. Auch für das Europa der Jungsteinzeit und Bronzezeit existieren deutliche Hinweise. Für die Neandertaler gibt es aus verschiedenen Zeiten sogar mehrere bezeichnende Fundstellen. Auffallenderweise liefert sogar der älteste Menschenfund in (West-)Europa überhaupt deutliche Indizien für Kannibalismus – lange vor den Neandertalern.

Diese Fundstelle liegt in Nordspanien, in den Ausläufern der Sierra de Atapuerca. Hier, in der Höhle Gran Dolina, stießen Paläontologen erst vor kurzem auf Fossilien von Menschen, die dort vor fast 800 000 Jahren lebten. Einige Anthropologen halten diese Menschen für eine eigene Art, die sie als *Homo antecessor* bezeichnen.

Das Team spanischer Wissenschaftler, das diesen Fund 1994 entdeckte, fand zwischen den menschlichen Fossilien in derselben Schicht auch Steinwerkzeuge und Knochenreste von großen Tieren – darunter Hirschen, Wisenten, Nashörnern. Das Wild hatten die Menschen offensichtlich zubereitet und gegessen.

Auch die menschlichen Knochenstücke sind anscheinend Überbleibsel von Mahlzeiten. Sie tragen nämlich die gleichen Bearbeitungsspuren wie die Tierknochen: Haut und Fleisch hatte man heruntergeschnitten und abgeschabt, die großen Röhrenknochen und die Schädel aufgeschlagen. Die Forscher fanden 92 menschliche Fragmente, die zu sechs Personen gehört hatten.

Darüber, ob auch die Neandertaler Kannibalen waren – die vor etwa 150 000 Jahren bis vor 35 000 Jahren, also viel später, lebten –, zerbrechen Anthropologen sich bereits seit über hundert Jahren den Kopf. Denn im ausgehenden neunzehnten Jahrhundert fand der kroatische Paläoanthropologe Dragutin Gorjanovič-Kramberger in der Krapina-Höhle in Kroatien verdächtige Fossilien von frühen Neandertalern, die vor ungefähr 130 000 Jahren gelebt hatten. Die Menschenknochen stammen von mehr als zwanzig Individuen. Sie lagen zerstreut, sind zerbrochen und tragen Schnittspuren. Leider wurden diese brüchigen Fossilien nach heutigen Kriterien recht unsanft behandelt. Um sie zu konservieren, erhielten sie damals überdies eine dicke Schutzschicht, was mutmaßliche Werkzeugspuren undeutlich macht.

Dennoch meinen einige meiner Kollegen an den Fossilien zu erkennen, dass diese Menschen kannibalischen Praktiken zum Opfer gefallen waren. Ihrer Ansicht nach wurden die Knochen brutal bearbeitet. Doch nicht alle Wissenschaftler sind dieser Meinung. Manche glauben eher, dass die Knochen auf andere Weise zu Bruch gingen. Von der Höhlendecke könnten Felsbrocken darauf herabgestürzt sein, oder Raubtiere hatten sich über die Kadaver hergemacht. Einige halten auch eine besondere Bestattungsform für möglich, bei der die Skelette zerlegt und die Teile verstreut wurden.

Nach neuen Untersuchungen sind solche Zweifel allerdings nicht mehr angebracht. Diese Studien zeigen, dass in der Krapina-Höhle eindeutig Menschenfresser zu Werke gingen. Das Gleiche ist inzwischen für die Vindija-Höhle belegt, die ebenfalls in Kroatien liegt. Doch ist dieser Neandertaler-Fundort viel jünger. Die Individuen dort lebten vor nicht einmal 30 000 Jahren, in der letzten Eiszeit. In Vindija lagerten die Menschenfossilien überdies zwischen aufschlussreichen Überresten von Tierknochen.



Aufschlagen und Zerspleißen

Diese menschlichen Oberarmknochen wurden in ganzer Länge aufgeschlagen. So gewannen die Anasazi aus ihnen das Knochenmark. Ebenso wertvolle Nahrung stellte das Gehirn dar. Die vorgeschichtlichen Kannibalen öffneten stets auch die Schädel ihrer Opfer.

TIM D. WHITE

Kein Zweifel: Auch bei Neandertalern muss es Kannibalismus gegeben haben

Ein neuerer Fund in Südfrankreich an der Rhône bestärkt die These, dass bei den Neandertalern Kannibalismus vorkam. Seit neun Jahren gräbt dort in der Höhle von Moula-Guercy ein Team um Alban Defleur von der Université de la Méditerranée in Marseille. Hier hausten Neandertaler vor etwa 100 000 Jahren. In der entsprechenden Schicht barg das Team die Überreste von mindestens sechs Neandertalern: Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen. Das jüngste Individuum war sechs Jahre alt.

Die Präzision, mit der die Forscher bei dieser Ausgrabung vorgingen, erinnert an kriminalistische Methoden. Defleurs Mitarbeiter registrierten jedes Detail so akribisch, dass man sich die steinzeitliche Szenerie deutlich vorstellen kann. Orientierung und Form jedes Knochenstücks, auch jedes Tierfossils und Pflanzenrests, und jedes behauenen und benutzten Steins dokumentierten sie genauestens. Die Aufzeichnungen lassen unter anderem deutlich erkennen, dass die Menschenknochen um eine Feuerstelle herum zu liegen kamen.

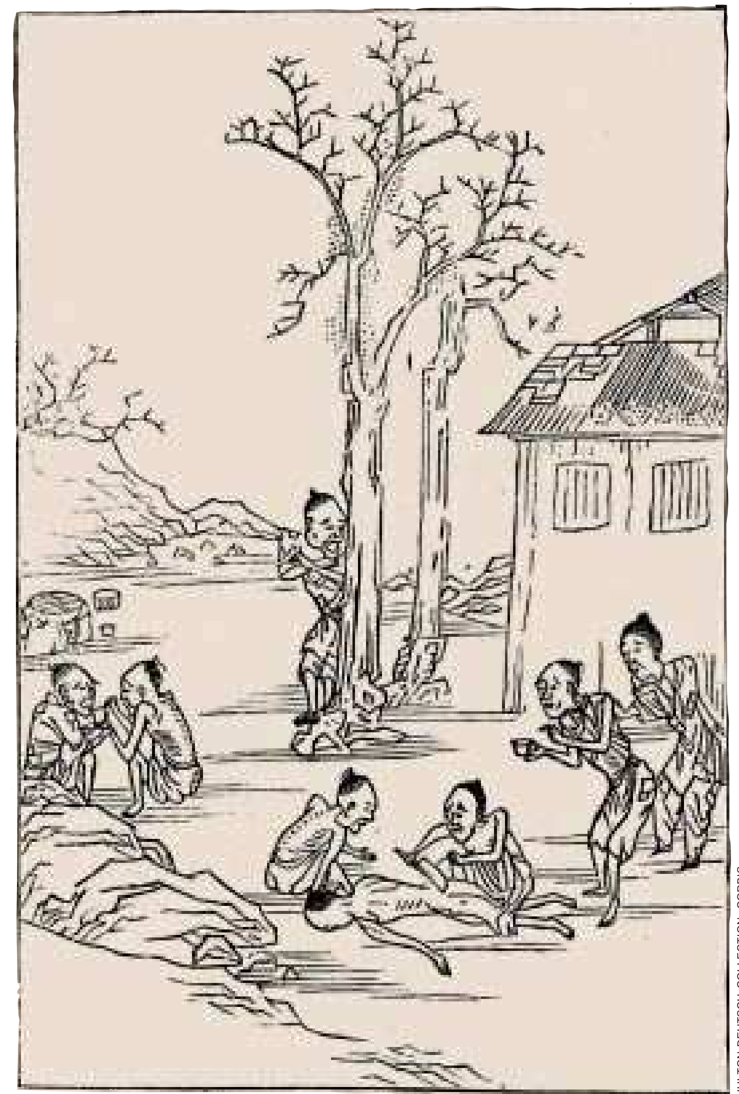
Auch die mikroskopische Analyse der Fundstücke ergab, dass hier offenbar Menschen zum Verzehr zubereitet worden waren. Ihre Kadaver hatte man genauso weiterverarbeitet wie die Tiere, deren Überreste herumlagen.

Trotz all dieser Nachweise wissen wir nicht, wie verbreitet kannibalische Sitten einst waren. Wie oft aßen Menschen früher ihresgleichen, und in welchen Situationen taten sie das? Die beschriebenen Funde aus der Altsteinzeit Europas, die von Menschenfressern zeugen, stammen von räumlich und zeitlich weit auseinander liegenden Stellen. Dies spricht dafür, dass es sich um keine Ausnahmeerscheinung handelte. Gran Dolina stellt die einzige europäische Fundstelle mit hominiden Überresten aus dieser frühen Zeit dar, und sie zeugt von Kannibalismus. Und auch die Neandertaler, die in sehr viel späterer Zeit lebten, praktizierten Kannibalismus gleich an mehreren über Europa verteilten Orten, zudem Hunderte von Generationen voneinander getrennt. An sämtlichen dieser Plätze gingen die Grabungsteams sachgerecht vor und interpretierten die Funde umsichtig. Für ▶

die meisten Paläoanthropologen ist es daher inzwischen keine Frage mehr, ob es damals Kannibalismus gab. Doch rätseln wir, was jene Menschen zu solchen Verhaltensweisen trieb.

Von den Neandertalern zu den Anasazi ist es ein weiter Sprung. Diese Indianer, die Mais anbauten, prägten im Südwesten der heutigen USA über mehr als eineinhalb Jahrtausende eine eigenständige Kultur. In den Jahrhunderten vor der Ankunft der Spanier errichteten sie die eindrucksvollen großen Pueblo-Siedlungen und bauten in überhängende Felswände schwer erreichbare Höhlenstädte. Auch sonst hinterließen sie besonders reiche kulturelle Zeugnisse.

Unser früheres Bild von den Anasazi als harmlosen Ackerbauern haben Forschungen in jüngerer Zeit allerdings umgeworfen. Als Erster schöpfte Christy G. Turner II von der Arizona State University in Tempe Verdacht, als er in den sechziger und siebziger Jahren in einer Reihe von Orten im Anasazi-Gebiet – in Arizona, New Mexico und Colorado – auf Ansammlungen von zerbrochenen, teils verbrannten menschlichen Knochen stieß. Als er diese gründlicher untersuchte, fand er jedes Mal die eigentlich unverkennbaren Anzeichen dafür, dass diese Menschen zum Essen zubereitet worden waren. Aber konnten sie wirklich Kannibalismus zum Opfer gefallen sein? Wer die spätere Geschichte der Pueblo-Indianer verfolgt, wird kaum auf Anhaltspunkte dafür stoßen, dass derlei dort einst üblich war. Und die heutige Bevölkerung, die sich als Nachkommen der Anasazi sieht, kann sich überhaupt nicht vorstellen, dass sie von Menschenfressern abstammt, und reagiert auf solche Andeutungen empört.



Eine Szene aus China vom ausgehenden achtzehnten Jahrhundert: Halb verhungerte Menschen verschlingen Menschenfleisch.

HULTON-DEUTSCH COLLECTION, CORBIS

Die Körper ihrer Toten bestatteten die Anasazi meistens unversehrt, wie viele komplette Skelette beweisen, und oft zusammen mit kunstvoll verzierten Keramikgefäßen. Doch Turner dokumentierte mehrere Dutzend Fundorte, die nicht nach Begräbnisstätten aussahen und an denen unzusammenhängende Knochenstücke zum Vorschein kamen, von denen viele Brandspuren aufwiesen. Dieserart menschliche Skelettfragmente gehen inzwischen in die Zehntausende. In einem Gebiet etwa von der Größe Europas haben Menschen über 800 Jahre lang ihre Artgenossen gegessen. Ich selbst untersuchte vor etwa zehn Jahren die Überreste einer derartigen Fundstelle im Mancos Canyon in Südwest-Colorado. Allein dort lagen über 2000 Knochenteile, die wir mindestens 29 Männern, Frauen und Kindern zuordnen konnten. Auf solche Knochenansammlungen stießen Forscher in kleinen Dörfern wie großen Städten. Viele Stellen stammen offenbar aus der Zeit, als die jeweilige Siedlung aufgegeben wurde. Oft sieht es so aus, als wurden die Körperteile zuerst im Feuer gegart und danach das Fleisch abgelöst. Ausnahmslos erst dann entnahm man Gehirn und Knochenmark. Einige der langen Knochensplitter müssen noch in Keramikgefäßen gekocht worden sein.

In fossilem Kot eines Anasazi fanden sich Spuren von Menschenfleisch

Die menschlichen Skelettfragmente von Mancos zeigen die gleichen Spuren wie beispielsweise die Knochen von Hirschen und Dickhornschafen, Tiere, welche die Anasazi jagten und aßen. Alles zusammengenommen besagt, dass dieses Volk Menschen häutete und röstete, dann das Fleisch ablöste und die Gelenke zertrennte, als Nächstes die Röhrenknochen auf Ambossen mit Hammersteinen aufschlug und die porösen Knochen zertrümmerte und in Keramikgefäßen kochte.

Doch nicht jeder meiner Kollegen ist mit dieser Interpretation einverstanden. Manche der Gegenargumente wirken allerdings eher politisch als wissenschaftlich motiviert. Nicht wenige Anthropologen sind der Meinung, dass Forscher mit ihren Erkenntnissen auf gesellschaftliche Empfindlichkeiten Rücksicht nehmen sollten. Für diese Anthropologen ist Kannibalismus ein kulturell zu heikles und politisch zu verwerfliches Phänomen, als dass man selbst eindeutige Beweise dafür akzeptieren darf.

Den überzeugendsten Befund für Kannibalismus bei den Anasazi lieferten vor einem Jahr Richard A. Marlar von der Universität von Colorado in Boulder und seine Kollegen. Bei Mesa Verde in Südwest-Colorado, in Cowboy Wash, gruben ihre Arbeiter drei Behausungen aus, die etwa um das Jahr 1150 bewohnt waren. Der dortige Fund sah



Kannibalismus in historischer Zeit

Inwieweit Berichte von Zeitzeugen über Menschenfresser der Wahrheit entsprachen, lässt sich heute vielfach nicht mehr feststellen. Nur wenige Vorkommnisse wurden eindeutig dokumentiert. Auf diesem Holzschnitt skizzierte ein europäischer Künstler 1497 kannibalische Praktiken in der Neuen Welt.

genauso aus wie der in Mancos und die an anderen solchen Orten der Anasazi: viele unzusammenhängende, zerbrochene Menschenknochen lagen herum, und nichts sprach für eine Grabstätte.

Marlar und seine Kollegen führten dazu auch aufschlussreiche biochemische Analysen durch. An einem der Keramikgefäße entdeckten sie Rückstände von menschlichem Myoglobin – einem Protein, das in Herz und Muskeln vorkommt. In dem Topf war demnach vermutlich Menschenfleisch gekocht worden. Die Forscher untersuchten auch einen menschlichen Koprolithen, der in einem der Häuser bei der Feuerstelle gelegen hatte. Auch dieser fossile Kot enthielt menschliches Myoglobin: Derjenige, der ihn hinterlassen hatte, muss Menschenfleisch gegessen haben.

Dass frühere Menschen Kannibalismus betrieben, daran besteht nun kaum noch Zweifel. Nur – warum taten sie das? Diese Frage lässt sich gar nicht leicht beantworten. Sicherlich trieb die Menschen oft der Hunger. Doch ob sie nur notgedrungen magere Zeiten überbrückten oder ob sie auch den Geschmack von Menschenfleisch schätzten, und ob sie ganz gern die Gelegenheit nutzten, um irgendwelche unbeliebten Leute loszuwerden, wissen wir nicht. Sogar von den Anasazi, die doch recht gründlich erforscht sind, können wir nicht sagen, ob Hunger den Ausschlag gab oder ob sie andere Menschen zum Beispiel aus religiöser Überzeugung verzehrten. Vielleicht kamen beide Motive zusammen, vielleicht handelten sie aber aus noch anderen Gründen. Leugnen lässt sich Kannibalismus als Phänomen unserer Vergangenheit jedenfalls nicht mehr.

Literaturhinweise

Biochemical Evidence of Cannibalism at a Prehistoric Puebloan Site in Southwestern Colorado. Von R. A. Marlar et. al. in: Nature, Bd. 407, S. 74, 7. September 2000.

Neanderthal Cannibalism at Moula-Guercy, Ardèche, France. Von A. Defleur, T. D. White, P. Valensi, L. Slimak und E. Crégut-Bonnoure in: Science, Bd. 286, S. 128, 1. Oktober 1999.

Fijian Cannibalism: Osteological Evidence from Navatu. Von D. DeGusta in: American Journal of Physical Anthropology, Bd. 110, S. 215, Oktober 1999.

Does Man Eat Man? Inside the Great Cannibalism Controversy. Von L. Osborne in: Lingua Franca, Bd. 7, No. 4, S. 28, April/Mai 1997.

Prehistoric Cannibalism at Mancos 5MT-UMR-2346. Von T. D. White. Princeton University Press, 1992.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Tim D. White *ist am Museum für Wirbeltier-Zoologie an der Universität von Kalifornien in Berkeley einer der Direktoren des Labors für die Erforschung der Menschenevolution. An derselben Universität hält er eine Professur für Biologie. White gehört zu den Leitern des Middle Awash-Forschungsprojekts in Äthiopien.*

Wie die Lunge

Wir könnten nur mühsam nach Luft ringen, gäbe die Lunge keine Stoffe ab, die den Kollaps der Lungenbläschen verhindern. Wie sie das macht, versuchen Forscher mit trickreichen optischen Methoden und live an einzelnen Zellen zu ergründen.

Von Paul Dietl, Thomas Haller und Stefan W. Schneider

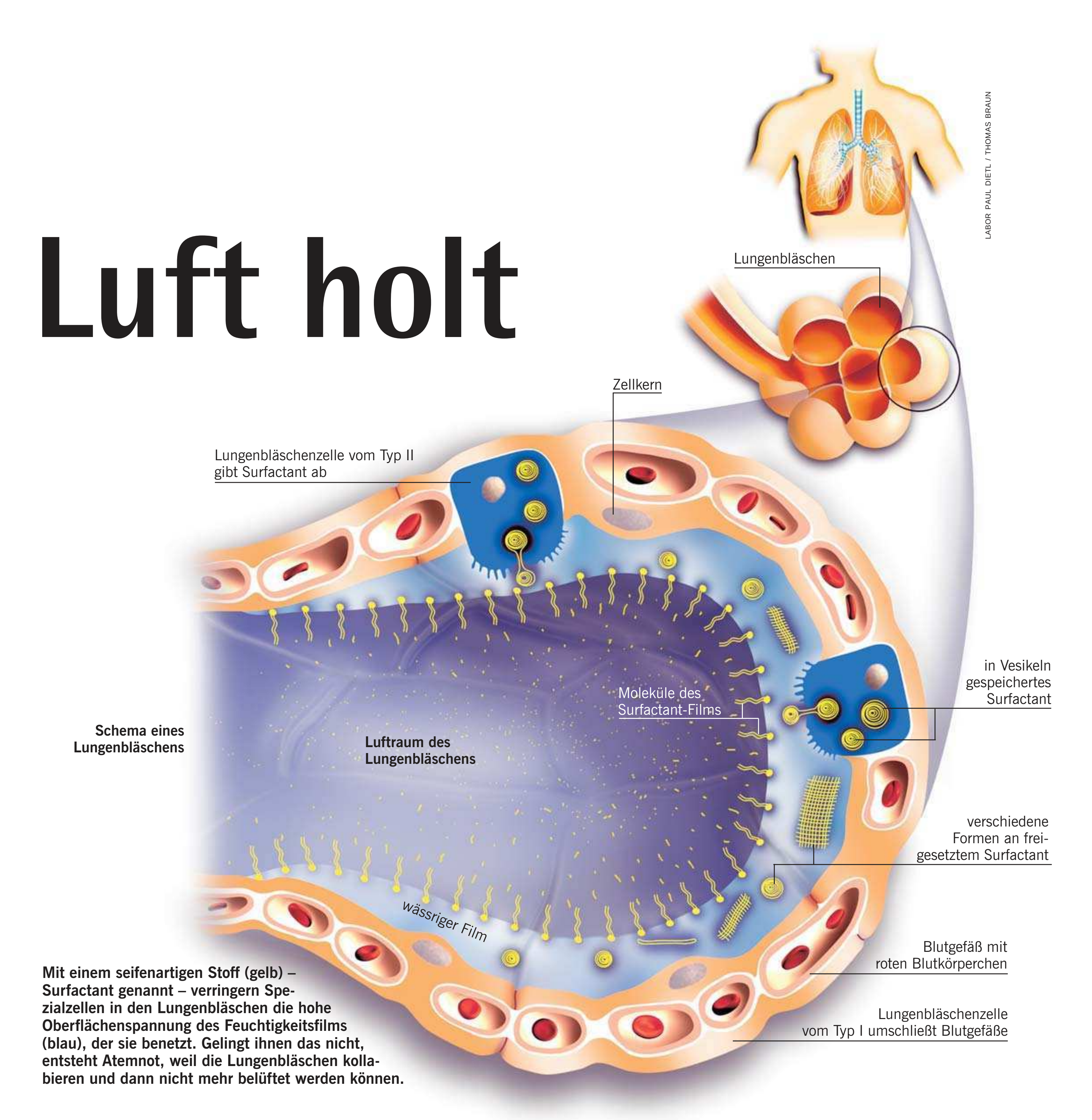
Wie lassen sich 300 Millionen durch ein Röhrensystem verbundene Luftballone so aufblasen, dass alle gleichmäßig gedehnt werden? Einer recht ähnlichen Aufgabe sehen sich unsere Lungen beim Einatmen gegenüber. Luftröhre, Bronchien und ihre immer feineren Verzweigungen sind praktisch bloße Verbindungsröhren. Sie münden letztlich in winzige elastische Bläschen, die frische, sauerstoffreiche Luft ansaugen, wenn sie gedehnt werden. Luft und Blut treffen dort auf einer Gesamtfläche von etwa der Größe einer Vier-Zimmer-Wohnung zusammen – getrennt nur durch hauchdünnes Gewebe, so dick wie etwa ein Fünfzigstel eines Blatt Papiers. So kann Sauerstoff leicht ins Blut diffundieren und umgekehrt Kohlendioxid in die auszuatmende Luft.

Zu Stande kommt die enorme Fläche durch die große Zahl von Lungenbläschen oder „Alveolen“, wie die ballonartigen Endstücke der Atemwege fachsprachlich heißen. Ihre ständig befeuchtete Wandung ist elastisch genug, um mehr als 20000-mal am Tag gedehnt zu werden, hat aber die Neigung zu kollabieren. Dem liegt ein physikalisches Prinzip zu Grunde, das jeder vom Seifenblasenpusten kennt. Bläst man eines der schillernden Gebilde auf, ohne es vom Strohhalm zu lösen, dann schnurrt es zusammen, sobald man das Mundstück freigibt. Schuld daran ist die so genannte Oberflächenspannung an der Grenzschicht zwischen Gasen und Flüssigkeiten.

Die Lunge wirkt dem fatalen Prozess mit speziellen „seifenartigen“ Stoffen entgegen: Diese vermindern die Oberflächenspannung und ermöglichen dadurch ein gleichmäßiges Belüften der Alveolen. Eine fein abgestimmte Produktion und Abgabe der „Dehnhilfe“ ist lebenswichtig; Fehlfunktionen können zu Lungenversagen führen. Verständlicherweise möchten Wissenschaftler deshalb möglichst genau wissen, wie die Lunge „sich schmiert“. Noch immer klaffen hier große Lücken. Mit trickreichen optischen Methoden können wir jedoch seit kurzem an einzelnen Lungenzellen live beobachten, wie sie den lebenswichtigen Stoff abgeben. Wir versprechen uns davon Einblicke in die allgemeinen Mechanismen, über die auch andere Zellen ihre Sekrete abgeben. Nebenbei aber erhoffen wir uns auch neue Ansätze für eine wirksamere Therapie gegen verschiedene Formen des so genannten Atemnot-Syndroms. Denn unser Verfahren ließe sich zu einem Testsystem für potenzielle Medikamente ausbauen.

Noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts bestand die Ansicht, die Lunge verdanke ihre mechanischen Eigenschaften hauptsächlich einem Netzwerk von elastischen Fasern: Wie Gummibänder sollten sie beim Einatmen gedehnt werden, um beim Ausatmen dann passiv zusammenzuschnurren. Dies entspricht der Alltagserfahrung, dass Luftholen Muskelkraft kostet; denn dazu muss der Brustkorb gedehnt und/oder das Zwerchfell gesenkt werden. Das Ausatmen geschieht dagegen, solange man ruht, fast von allein. Ins Wanken kam das reine „Gummiband-Konzept“ schon im Jahre 1929 durch ein ebenso einfaches wie kluges Experiment. Der Schweizer Arzt Kurt von Neergaard experimentierte damals mit explantierten Lungen eingeschläferter Hunde. Verblüfft stellte er fest, dass sich normale, noch lufthaltige Lungen schwerer auf ein bestimmtes Volumen „aufblasen“ lassen als wassergefüllte. Da die Wasserfüllung sich nicht direkt auf die elastischen Fasern im Lungengewebe auswirken sollte, musste sie einen anderen Widerstand aufgehoben haben, der in dem normal lufthaltigen Organ ein Einatmen erschwerte. Von Neergaard vermutete ihn in der Oberflächenspannung an der Grenze zwischen der Atemluft und dem Feuchtigkeitsfilm in den Lungenbläschen. Tatsächlich schienen seine experimentellen Daten gut mit dem theoretisch nötigen zusätzlichen Druck in den Lungen übereinzustimmen, den er probeweise mit dem Wert für die Oberflächenspannung von Blutserum berechnete.

Luft holt



Schema eines Lungenbläschens

Mit einem seifenartigen Stoff (gelb) – Surfactant genannt – verringern Spezialzellen in den Lungenbläschen die hohe Oberflächenspannung des Feuchtigkeitsfilms (blau), der sie benetzt. Gelingt ihnen das nicht, entsteht Atemnot, weil die Lungenbläschen kollabieren und dann nicht mehr belüftet werden können.

Man würde annehmen, das grundlegend neue Konzept einer Oberflächenspannung in der Lunge hätte sogleich die Atmungsphysiologen in aller Welt beflügelt. Doch wie allzu oft war eine Sprachgrenze auch eine wissenschaftliche: Der Artikel, in Deutsch verfasst, verstaubte jahrzehntelang in den Regalen diverser Bibliotheken.

Erst in den frühen fünfziger Jahren wurde der Faden wieder aufgegriffen, als der Amerikaner E. J. Radford an der Harvard University in Boston ähnliche Experimente durchführte. Inzwischen war der feinere Aufbau der Lungen besser bekannt, was manche Korrekturen erforderte. Radfords Extrapolationen nach musste die tatsächliche innere Oberfläche zehnmal größer sein als bisher gedacht. Anders ausgedrückt: Die tatsächliche Oberflächenspannung in der Lunge konnte nur ein Zehntel der von Serum betragen. Zu postulieren war deshalb für das Organ mindestens eine oberflächenaktive Substanz, englisch *surface active agent*, fachsprachlich kurz Surfactant genannt. Sie sollte sich als Film über die feuchte Innenseite der Lungenbläschen legen und die Spannung verringern.

Das Weitere war dann nur mehr eine Frage der Zeit: 1956 wies der Amerikaner John Clements am Heeres-Chemie-Zentrum in Maryland nach, dass Extrakte aus der Lunge tatsächlich die Oberflächenspannung reduzieren und Alveolen vor dem Kollaps bewahren. Das Lungen- ▶

Surfactant entpuppte sich als ein ganzer Cocktail von Stoffen. Seine chemischen Komponenten sind heute weitgehend erforscht. Hauptbestandteil bilden zwei Phospholipide: eine Lecithin-Variante sowie Phosphatidyl-glycerol. Diese fettartigen Moleküle mit ihrem wasserliebenden Kopf eignen sich besonders gut, die Oberflächenspannung zu reduzieren. Daneben enthält der Cocktail spezielle Proteine und Kohlenhydrate.

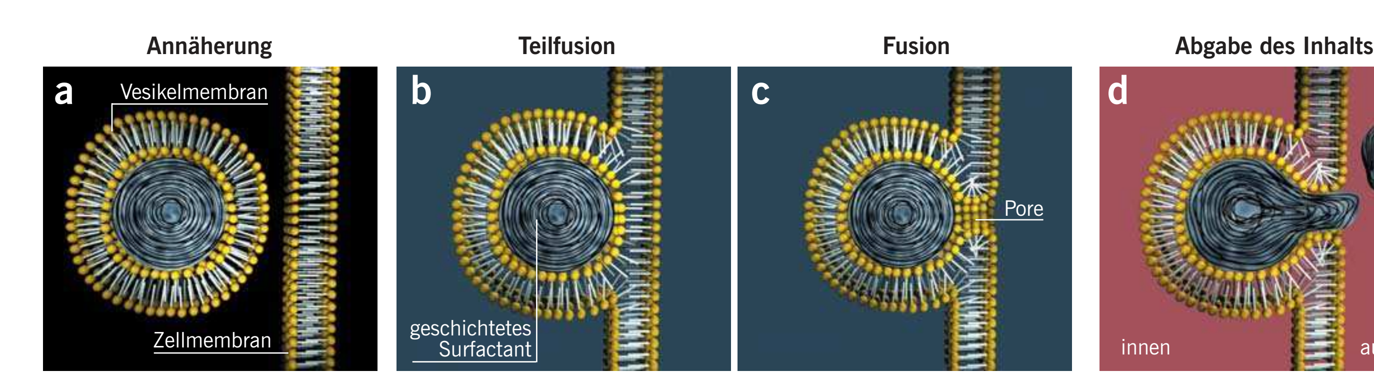
Die Mixtur entstammte, wie das Mikroskop verriet, speziellen Zellen (Fotos rechts). Sie machen nur einen Bruchteil der Bläschenwandung aus, sind jedoch nach heutiger Erkenntnis die aktiven Steuerelemente – und das nicht nur für die Produktion und Abgabe von Surfactant. Aus den feinen Blutgefäßen, die alle Lungenbläschen umspinnen, sickern ständig gelöste Salze und Wasser in den Hohlraum ein. Ein Mensch würde quasi ertrinken, wenn die Spezialzellen nicht fortwährend die überschüssige Flüssigkeit wieder abpumpten. Zurück bleiben darf lediglich ein hauchdünner Flüssigkeitsfilm: die so genannte Hypophase. Was die Zellen an Surfactant abgeben, tritt zunächst in diesen Film über und lagert sich ihm dann von selbst wie eine Haut auf, an der eigentlichen Grenze zur Luft. Bei der Abgabe selbst ist präzise Steuerung gefragt: Ein zu wenig an Surfactant kann den Kollaps, ein Zuviel das Überdehnen der Lungenbläschen nach sich ziehen.

Bereits im Jahr 1958 hatten Mary Ellen Avery und Jere Mead an der Harvard University in Boston (Massachusetts) nachgewiesen, dass Frühgeborene, die an Atemnot verstarben, in ihrer Lunge kein oder zu wenig Surfactant enthielten. Damit war die unmittelbare Ursache des so genannten Neugeborenen-Atemnot-Syndroms geklärt. Nichts beflügelt ein Forschungsgebiet mehr als seine unmittelbare Bedeutung für den Menschen – aus diesem Grund ist die Spezialzelle der Lungenbläschen seither ein begehrtes Studienobjekt für Wissenschaftler verschiedener Disziplinen, darunter auch von uns. Wir interessieren uns beispielsweise im Detail dafür, wie das in der Zelle gespeicherte Surfactant-Material austritt. Als makromolekulares Aggregat kann es die Außenmembran der Zelle nicht ohne weiteres durchdringen und wird deshalb auf biologisch bewährte Weise ausgeschleust: verpackt in kleine Behälter (Vesikel), deren Hülle schließlich punktuell so mit der äußeren Membran verschmilzt, dass eine Pore nach außen entsteht. Auf dem gleichen Wege – fachsprachlich Exocytose genannt – geben beispielsweise Nervenzellen geregelt ihre Signalstoffe ab, und Drüsenzellen ihre Hormone. Bestimmte Gifte – darunter das Toxin des Tetanus-Erregers oder der Schwarzen Witwe – lassen den Prozess entgleisen und führen deshalb zu schweren Problemen.

Doch zurück zu den uns interessierenden Speicher- und Transportbläschen für Surfactant. Es liegt darin nicht etwa als durchgerührte Suppe vor, sondern vielmehr hoch geordnet als eine Art

ALLE ABBILDUNGEN: LABOR PAUL DIETL

Sonnig leuchten auf dem linken Mikrofoto drei angefärbte Spezialzellen vom Typ II einer Rattenlunge. Die punktförmigen „Sonnenflecken" um den zentralen Zellkern sind Speicherbehälter (Vesikel) für Surfactant. Ihre Kugelform ist auf der Kontrastaufnahme einer anderen kultivierten Zelle (oben) zu erkennen.



Auf bestimmte Signale hin wandern die Speichervesikel, Behälter voller Surfactant, zur äußeren Zellmembran (a) und verschmelzen mit ihr zunächst nur teilweise (b). Eine enge Pore nach außen entsteht (c), und das Surfactant-Material tritt aus (d). Jeder Schritt wird von der Zelle geregelt, abgestimmt auf den Bedarf in der Lunge.

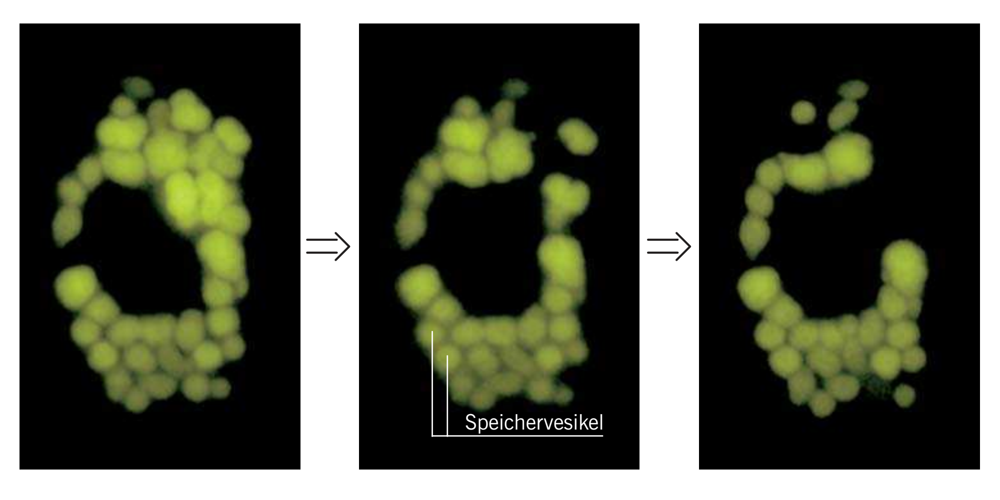
Zwiebel aus mehreren Phospolipid-Schichten. Elektronenmikroskopiker haben diesen relativ großen Gebilden deshalb den Namen Lamellenkörperchen gegeben. Nach dem Ausschleusen kann das Material eine gitterartige Struktur annehmen, die an leere gestapelte Bierkisten erinnert. Wie das geschieht und wozu ist allerdings immer noch nicht genau geklärt.

Seufzen erleichtert das Atmen

Von den vielen Schritten bis zur Abgabe in die Lungenbläschen ist die Exozytose zwar nur der letzte, aber doch der entscheidende: Eine stets angepasste Ausfuhr ist allein schon deshalb notwendig, weil die Spezialzelle das Material auch wieder reimportiert und neuerlich verwendet. Dieses rege Recycling kompliziert die Sache für uns Forscher, sagt doch die aktuelle Menge an freiem Surfactant in der gesamten Lunge nichts darüber aus, wie viel jeweils exportiert wird. Unter anderem deshalb versuchten Wissenschaftler in den siebziger Jahren, die Spezialzellen in Kulturschalen zu untersuchen. Es gelang ihnen, sie aus dem Lungengewebe von Tieren (meist Ratten) herauszulösen und in einem Nährmedium mehrere Tage am Leben zu erhalten. Noch heute arbeiten Fachleute vorwiegend mit solchen „Primärkulturen“, um den Export von Surfactant zu erforschen. Bei der herkömmlichen Messmethode wird dem Nährmedium ein Lipid zugesetzt, das mit dem Wasserstoff-Isotop Tritium radioaktiv markiert ist. Die Zellen nehmen das Fettmolekül auf und bauen es in ihr Surfactant ein. Was sich dann an Radioaktivität in frischer Nährlösung wiederfindet, ist ein Maß für die abgegebene Menge an Surfactant.

Auf dieser Methode fußten etwa zwei Jahrzehnte lang viele grundlegende Untersuchungen zur Frage, welche biologischen Faktoren den Export fördern oder hemmen. Den wohl eindrucksvollsten Effekt entdeckten Hubert Wirtz und Leland Dobbs an der Universität von San Francisco im Jahr 1990: Eine einzige Dehnung der Zellen – das entspricht einem tiefen Atemzug – kann schon die freigesetzte Menge an Surfactant erheblich steigern. Möglicherweise dienen gelegentliche tiefe Seufzer, die jeder Mensch reflektorisch ausführt, allein diesem Zweck.

Bei den meisten anderen fördernden Faktoren ist die Bedeutung weniger klar. Am ehesten leuchtet noch ein, dass auch ein Adrenalin-Stoß wirkt: Das Stresshormon aus dem Mark der Nebenniere soll in alarmierenden Situationen wohl das Atmen erleichtern. Offen bleibt hingegen bisher, warum die kultivierten Spezialzellen ausgerechnet am stärksten auf zugeführtes Adenosintriphosphat (ATP) ansprechen. Die energiereiche Substanz ist ein Bestandteil aller Zellen. Sobald Entzündungen, Gifte oder andere Einflüsse Zellen im Körper schädigen oder zerstören, dürfte zwangsläufig ATP austreten. Es könnte somit bei ganz verschiedenartigen Erkrankungen die Lungenfunktion fördern. Weniger plausibel ist die Spekulation, Zellen im gesunden Körper setzten die Substanz gezielt als Botenstoff ein, um den Export von Surfactant zu steigern.



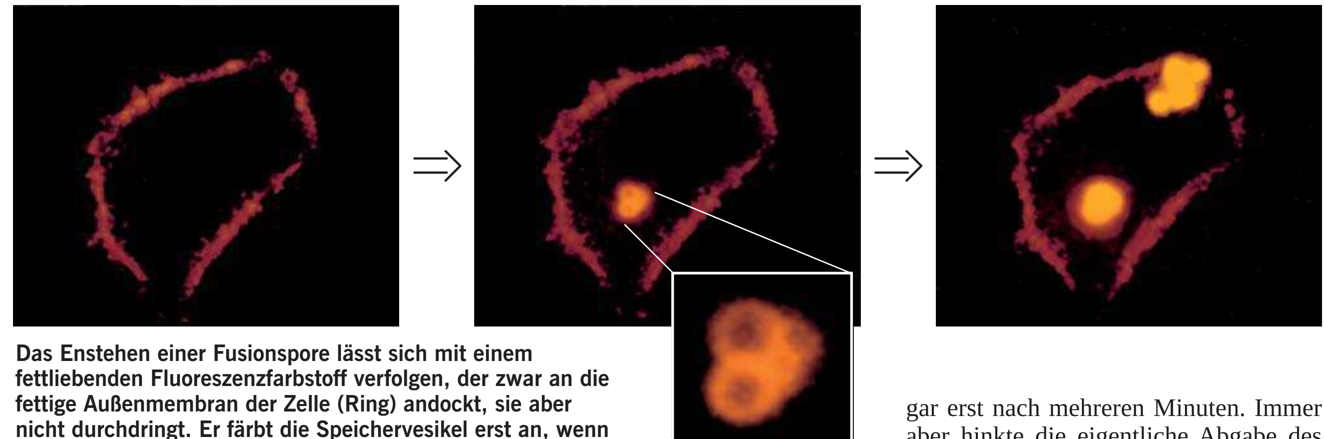
Die Speicher (grüne Kugeln) einer Zelle entleeren sich nicht alle auf einmal. Nur im oberen rechten Viertel verschwindet hier die grüne Fluoreszenz nach und nach. Sie rührt von einem Fluoreszenzfarbstoff her, der sich im offenbar sauren inneren Milieu der Speichervesikel stark anreichert, aber rasch herausdiffundiert, wenn eine Pore entstanden ist.

Live im Leuchtbad

Die pauschalen Messungen an Zellkulturen sind leider ein zu grobes Instrument, wenn man wie wir die Abgabe von Surfactant im Detail verfolgen möchte: an einzelnen Zellen, besser noch an einzelnen Lamellenkörperchen. Vor allem interessierte uns das Timing beim eigentlichen Austritt des Materials. Verfügte die Zelle noch über Regelmöglichkeiten, nachdem ein Transportbehälter an der Zellmembran angedockt und eine „Fusionspore“ gebildet hat? Ist zu diesem Zeitpunkt der Entleerungsvorgang noch zu stoppen?

Um buchstäblich Licht in das Dunkel zu bringen, brauchten wir geeignete Fluoreszenz-Farbstoffe. Normalerweise gelingt es nur selten, die Zellstruktur, die man damit sichtbar machen will, wirklich gezielt hervorzuheben. Uns aber kam eine Besonderheit der lamellären Körperchen entgegen: Sie sind relativ groß und enthalten offenbar ein saures Milieu. Letzteres belegte ein von uns gewählter Farbstoff, der sich generell in sauren Zellbereichen anreichert. Fachleuten ist er als Lyso Tracker Green bekannt, kurz: LTG. Unsere Zellen erhielten ihn vorübergehend als „Badezusatz“. Tatsächlich leuchteten die Lamellenkörperchen dann grün – und überraschenderweise nur sie. Vermutlich waren die Dinger mit mehr als einem tausendstel Millimeter Durchmesser einfach so voluminös und konnten so große Mengen des Farbstoffs aufnehmen, dass sie alle übrigen „sauren“ Strukturen in der Zelle um ein Vielfaches „überstrahlten“. Ein Glücksfall für uns. Geisterhaft grün schimmern die Körperchen ausschließlich vor ihrer Fusion mit der äußeren Zellmembran. Danach diffundiert der Farbstoff nach draußen, und die Fluoreszenz verschwindet vor Ort. Ihr lokales Erlöschen ermöglicht uns, die Fusion messtechnisch zu erfassen (Fotos oben).

Den komplementären Weg beschritten wir mit einem anderen Fluoreszenz-Farbstoff, FM 1-43. Die Substanz leuchtet hell, sobald sie sich an Lipide anlagert, kann aber Zellmembranen nicht durchdringen. Daher gelangt der Farbstoff nur über eine offene Pore von außen in die Körperchen, also erst nach der Fusion. Dort lagert er sich sofort in die Surfactant-Schichten ein, wo er nun intensiv orangegelb fluoresziert (Fotos auf Seite 50 oben). Dies liefert uns nicht nur ein zweites Zeitsignal für eine erfolgte Fusion; wir können so auch das fettartige Material direkt bei seinem anschließenden Austritt verfolgen.



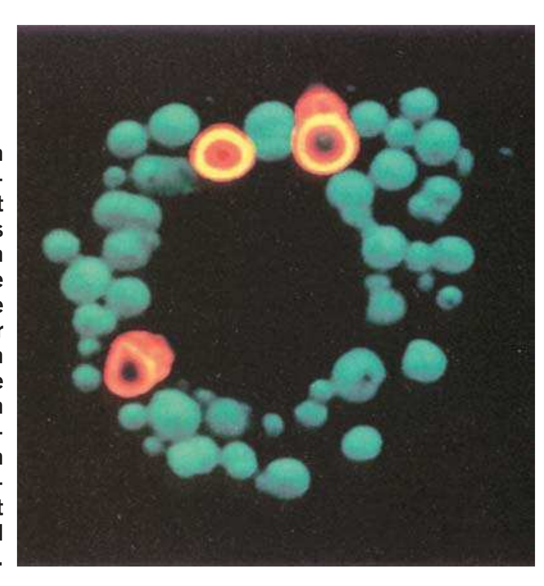
Das Enstehen einer Fusionspore lässt sich mit einem fettliebenden Fluoreszenzfarbstoff verfolgen, der zwar an die fettige Außenmembran der Zelle (Ring) andockt, sie aber nicht durchdringt. Er färbt die Speichervesikel erst an, wenn sie eine Pore ausbilden. Zunächst haben sich drei in der Mitte, rechts dann mehr Speicher geöffnet.

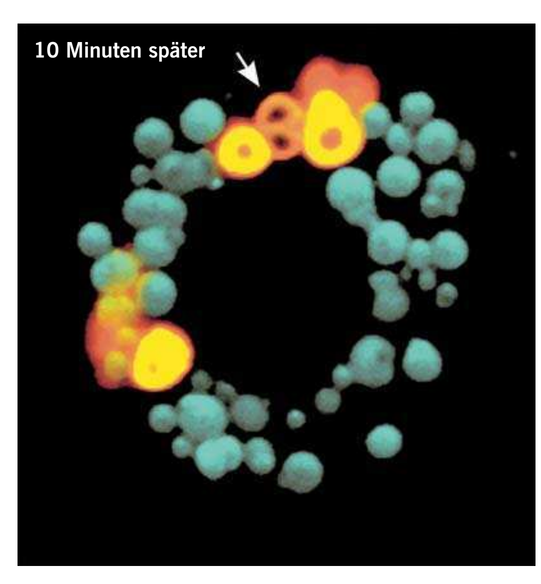
Bei einem gewöhnlichen Mikroskop erscheinen alle erfassten Objekte quasi wie in eine Bildebene gepresst. Um ein räumlich besseres Bild einer Spezialzelle in Aktion zu erhalten, verwenden wir deshalb ein so genanntes konfokales Mikroskop. Es erlaubt, die Zelle in viele virtuelle Scheibchen zu zerlegen, analog einer computertomographischen Untersuchung beim Menschen; jedes Scheibchen zeigt die fluoreszenz-markierten Strukturen einer definierten Ebene unverdeckt von anderen. Zudem können unsere beiden Färbemethoden simultan angewendet werden.

Was passierte nun, als wir eine Spezialzelle mit ATP reizten? In einem Zeitraum von rund zehn Minuten verloren einige Lamellenkörperchen ihre grüne Fluoreszenz und leuchteten jetzt orangegelb (Fotos unten). Das entsprach freilich keineswegs unserer herkömmlichen Vorstellung eines Ausschüttens. Denn das abzusondernde – orangegelbe – Material saß ja noch immer an derselben Stelle: in seinem Behälter. Wie kommt es dann nach draußen? Löst sich das Material auf und diffundiert langsam durch die Fusionspore hinaus, oder bleibt es als Klumpen zuerst liegen, um anschließend aktiv ausgestoßen zu werden? Bestimmte erst ein Schritt nach der Fusion, etwa eine spätere Expansion der Pore, die Geschwindigkeit, mit der Surfactant frei wird? Letzteres wäre medizinisch interessant. Denn dann könnte man die Fusionspore selbst pharmakologisch zu manipulieren versuchen, um beispielsweise bei Atemnot die Freisetzung von Surfactant anzukurbeln.

Wir verglichen daraufhin unsere Verfahren mit der herkömmlichen Tritium-Markierung und konnten so nicht nur die Zeit vom Reiz bis zum Entstehen einer Pore messen, sondern auch bis zum wirklichen Ausschütten von Surfactant. Erste Poren bildeten sich demnach frühestens nach zehn Sekunden, manche sogar erst nach mehreren Minuten. Immer aber hinkte die eigentliche Abgabe des Materials zeitlich um ein Vielfaches nach. Unser nahe liegender Verdacht war, dass eine frisch entstandene Pore zu eng ist und sich nur langsam erweitert. Allerdings durften wir noch nicht gleich die Pore allein für den Verzug verantwortlich machen: Immerhin hätten auch molekulare Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen des Surfactant und seiner unmittelbaren Umgebung den Austritt aus der Zelle erschweren können.

Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Fusionsporen in den Spezialzellen der Lunge gibt es zwar seit den späten sechziger Jahren, sie sind aber leider – technisch bedingt – nur Schnappschüsse von nicht mehr lebenden Zellen. Über das dynamische Geschehen in einer einzigen lebenden Zelle lassen sie daher nur beschränkte Aussagen zu. Solchen Aufnahmen zufolge waren die Poren jedenfalls weit enger als die lamellären Körperchen dick. Und das hieß, dass Surfactant womöglich erst durch eine Gestaltänderung – vom Knödel zur Makkaroni sozusagen – nach draußen gelangen könnte.

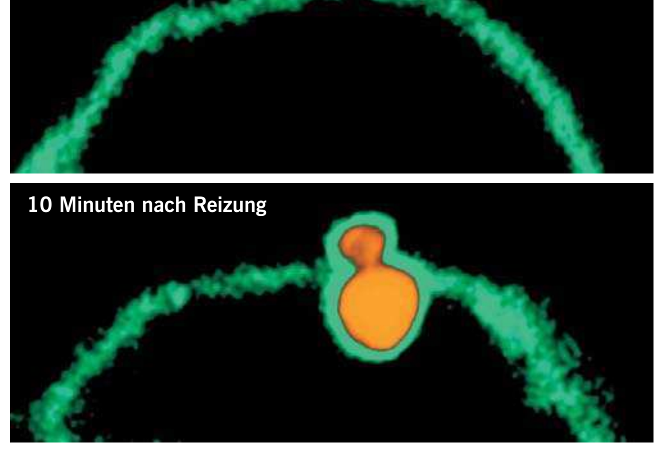


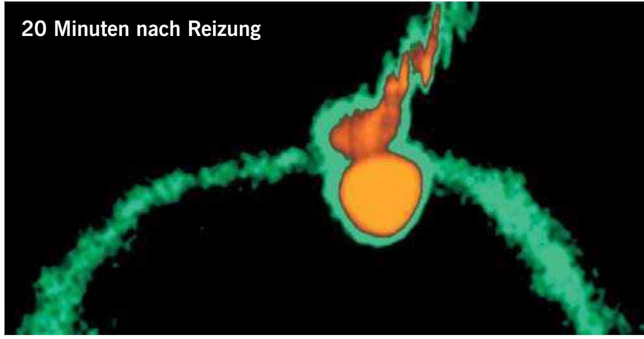


Eine Kombination beider Fluoreszenzfarbstoffe zeigt, dass exakt an den Stellen, wo das grüne Leuchten verschwindet, die orangegelbe Farbe erscheint (Pfeil). Aber selbst nach zehn Minuten haben einige der schon offenen Vesikeln kein Surfactant abgegeben. An diesem zuvor unbekannten Regelschritt könnten einmal Medikamente ansetzen.

Für weitergehende Studien an der lebenden Zelle, diesmal mit einem anderen Verfahren als der Fluoreszenz, suchten wir die Zusammenarbeit mit Hans Oberleithner an der Universität Münster, der sich seit Jahren mit der Anwendung der so genannten Rasterkraftmikroskopie für diese Zwecke beschäftigt (siehe seinen Artikel in Spektrum der Wissenschaft 4/1996, S. 76). Dieses Verfahren löst Oberflächenstrukturen mit unglaublicher Präzision auf und ist unter bestimmten Voraussetzungen optischen Methode überlegen. Ein winziger Stift an einem biegsamen Bügel tastet die Oberfläche zeilenweise ab, wobei er infolge atomarer Wechselwirkungen mit den Oberflächenmolekülen immer einen konstanten minimalen Abstand dazu einhält. Das Ganze ist grob vergleichbar mit einem Tonabnehmer eines Schallplattenspielers, der die Rillen der altmodischen schwarzen Scheiben abtastet. Im Falle des Rasterkraftmikroskops erstellt dann ein Computer aus dem Auf und Ab des Bügels ein Reliefbild. Auf diesem Wege ist es sogar möglich, die Dynamik der Oberflächenstrukturen von lebenden Zellen „online“ zu verfolgen.

Tatsächlich erschienen große relativ stabile Löcher auf unseren Zellen, wenn wir sie mit ATP behandelten (Abbildungen Seite 52). Diese mutmaßlichen Poren entstanden zunächst als Delle auf der Oberfläche. Die Phase kurz danach zeitlich aufzulösen bleibt noch eine Herausforderung. Gegenwärtig erlaubt die Technik erst etwa ein Bild pro Minute. Während dieser Spanne könnte aber eine sich ausbildende Fusionspore bereits ihre Form und lichte Weite erheblich verändert haben. Die schließlich entstandenen Öffnungen ließen sich jedoch rasterkraftmikroskopisch erfassen und vermessen. Sie erreichten im Laufe ihrer „Lebenszeit“ meist einen Durchmesser zwischen einem fünftel und einem Mikrometer (tausendstel Millimeter). Bei den größten würde somit der Inhalt der Lamellenkörperchen problemlos als Paket durchpassen. So etwas hatte man auf Grund der alten elektronenmikroskopischen Studien an toten, konservierten Zellen nicht erwartet.





Surfactant (orange) kann aus der Zellmembran (grüner Bogen) als „Knödel“ (Mitte), aber auch als „Makkaroni“ (unten) austreten. Ob sich das Material hierbei verändert, wissen die Forscher noch nicht. Die Einschnürung entspricht der Pore in der Zellmembran. Die Rotaufnahme wurde per Computer in die Grünaufnahme einkopiert.

Als wir schließlich an die methodischen Grenzen der Rasterkraftmikroskopie stießen, machten wir uns eine weitere Eigenschaft unseres fettliebenden, hauptsächlich orange leuchtenden Farbstoffs zu Nutze: Da FM 1-43 auch die Zellmembran färbt, diese allerdings mit grüner Fluoreszenz, konnten wir mit geeigneten Filterkombinationen im konfokalen Mikroskop die Plasmamembran und Surfactant getrennt hervorheben. Dadurch gelang es uns, die Fusionspore als Einschnürung des austretenden Materials genau an der Stelle darzustellen, wo die Plasmamembran ansetzt.

Von Knödeln und Makkaronis

Alle unsere Beobachtungen weisen auf ein mannigfaltiges Geschehen einer zeitlich steuer- und dosierbaren Abgabe hin. So können Fusionsporen lange Zeit sehr eng bleiben, sodass Surfactant gar nicht oder nur in Form dünner Makkaroni durchpasst. Gelegentlich entstehen auch zwei zusammenhängende kugelige Pakete, deren Taille durch die Fusionspore eingeschnürt ist (Fotos oben). Wir wissen derzeit nicht, welche Faktoren für die Umwandlung von „Knödel“ zu „Makkaroni“ – und vielleicht auch umgekehrt – ausschlaggebend sind. Ebenso wenig wissen wir, ob diese Formänderungen beispielsweise rascher einen aktiven Oberflächenfilm entstehen lassen. Nur selten jedenfalls erweitern sich die Fusionsporen so schnell, dass Surfactant in seiner ursprünglichen Form als Knödel die Zellen verlässt.

Nach unseren Erkenntnissen kann somit eine einmal entstandene Fusionspore ein beträchtliches Nadelöhr für den Austritt von Surfactant darstellen – und das über lange Zeit. Jüngst haben wir sogar mit „optischen Pinzetten“ eine Art Zangengeburt für Surfactant versucht. In diesen Experimenten, durchgeführt mit dem Institut für Medizinische Physik der Universität Innsbruck, ließen uns die Fusionsporen regelrecht fühlen, welche mechanische Barrieren sie für den Austritt von Surfactant darstellen.

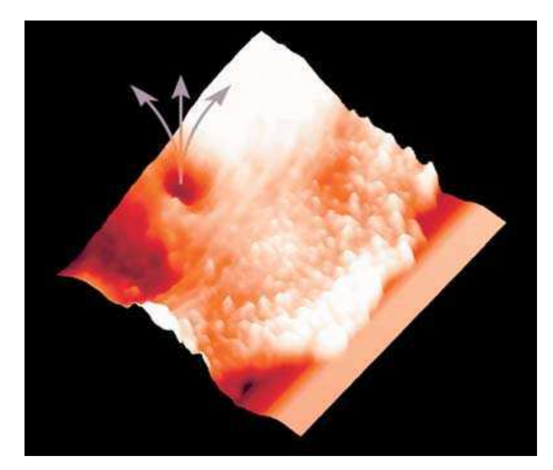
Wie eine solche Pore entsteht und sich erweitert liegt freilich noch immer weitgehend im Dunkeln. Wir wissen inzwischen lediglich, dass ATP beide Prozesse beschleunigt. Aber bis heute ist nicht einmal bekannt, ob die Wand einer ▶

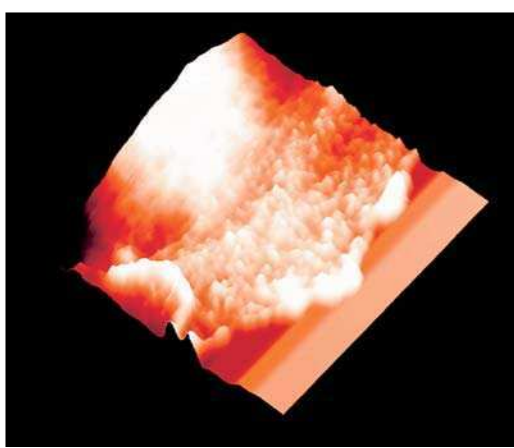
Literaturhinweise

Mechanisms of surfactant exocytosis in alveolar type II cells in vitro and in vivo. Von Paul Dietl et al. in: News in Physiological Sciences, Bd. 16, S. 239 (2001).

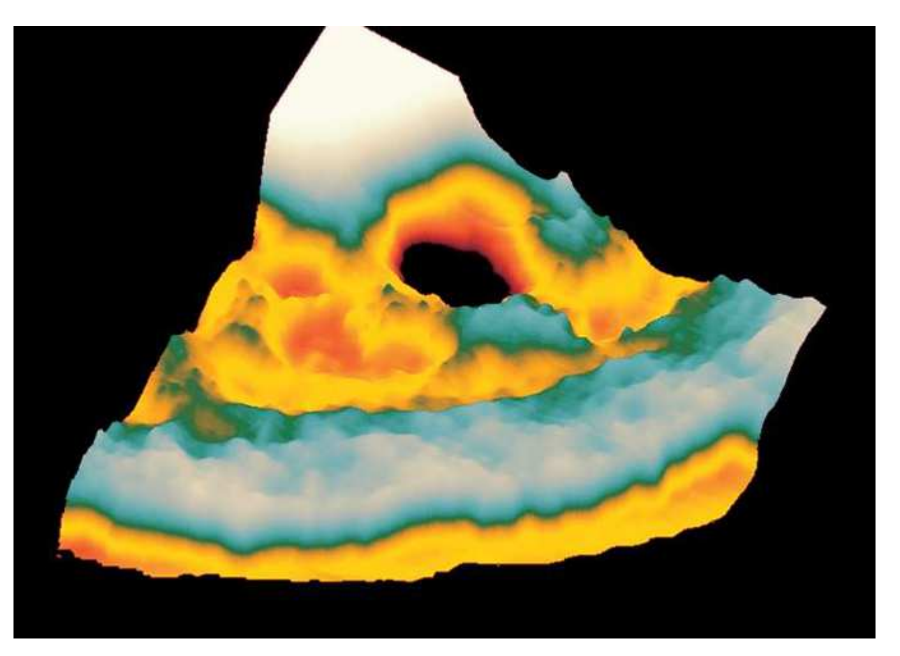
Dynamics of Surfactant Release in Alveolar Type II Cells. Von T. Haller et al. in: Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 95, S. 1579 (1998).

Weblinks bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*





Mit dem Rasterkraftmikroskop lässt sich die Zelloberfläche sozusagen aus der Vogelperspektive betrachten: Je heller die gewählte Farbcodierung, desto höher ist die Struktur. Nach einem Reiz zeigt sich eine neue Pore als dunkle Vertiefung (links oben) oder als Loch in der dreidimensionalen Ansicht (unten). Die Pfeile verdeutlichen den Austritt von Surfactant. Dann schließt sich die Pore allmählich wieder (links unten).



frischen Fusionspore aus „Fett“ oder „Fleisch“ besteht, also von Lipiden oder von Proteinen begrenzt wird. Man weiß jedoch, dass biologische Membranen mit dem inneren „Skelett“ der Zelle verbunden sind. Dieses Gerüst wiederum enthält kontraktile Elemente. Vieles spricht inzwischen dafür, dass die Pore in der Zellmembran auf diesem Wege aktiv erweitert oder auch wieder vorübergehend verengt werden kann. Letzteres würde erklären, warum in manchen Zellen teilentleerte Transportbläschen auftreten.

Es mag erstaunen, dass wir Wissenschaftler zu Beginn des 3. Jahrtausends über das, was in der Lunge wirklich passiert, noch so wenig wissen. Doch man darf nie vergessen, dass fast alle unsere Ergebnisse zwar unter genau definierten, aber eben sehr unnatürlichen Bedingungen erzielt wurden. Vieles bleibt zu klären. Wie verhält sich eine Spezialzelle, die im Rhythmus des Atmens immer wieder gedehnt und entdehnt wird? Klaffen bei jedem Einatmen die Fusionsporen auseinander? Wird durch molekulare Kräfte in dem hauchdünnen wässrigen Film, der die Lungenbläschen befeuchtet, Surfactant durch die Fusionsporen auch herausgezogen? Wie verhalten sich die Spezialzellen im Verband mit den „gewöhnlichen“ Lungenzellen? Was löst natürlicherweise den Nachschub an Surfactant aus und welche molekularen Schritte sind daran beteiligt? Zahlreiche dieser Fragen werden erst mit Hilfe adäquater experimenteller Modelle zu beantworten sein, oder durch bessere Messmethoden am lebenden Objekt. Zellkulturen an Luft-Flüssigkeits-Grenzschichten, wie wir sie nutzen, bilden nur erste Ansätze. Wir hoffen aber, einmal durch so genanntes Tissue Engineering Lungenbläschen in Gewebekultur nachbauen und daran das Verhalten der Spezialzellen „naturnäher“ studieren zu können.

Letztlich sollten diese Erkenntnisse zu einer effizienteren, vielleicht auch kostengünstigeren Therapie verschiedenster Formen des Atemnot-Syndroms führen. Eine Fehlfunktion der Spezialzellen kann als lebensbedrohliche Komplikation bei Blutvergiftungen, Schock und anderen Krankheitszuständen auftreten und ist derzeit nur recht schwer zu behandeln. Ersatz-Surfactant aus Schlachttieren ist rar und somit teuer, als Fremdstoff außerdem nicht unbedenklich. In diesen Fällen könnten geeignete Pharmaka die Fusionsporen öffnen oder auch länger offen halten und auf diese Weise Patienten über eine kritische Phase der Atemnot hinweghelfen. Die ehrgeizigen Pläne, derartige Medikamente zu entwickeln, sind allerdings ohne weitere intensive Grundlagenforschung kaum zu verwirklichen. ■





Paul Dietl *(links) ist Professor am Physiologischen Institut der Universität Innsbruck,* ***Thomas Haller*** *(Mitte) Universitätsassistent am selben Institut. Dietl, 1983 dort in Medizin promoviert, und Haller, 1997 in Biologie promoviert, befassen sich schwerpunktmäßig mit der Exocytose von Surfactant und erarbeiten bessere bildgebende Verfahren zur Darstellung solcher Prozesse.* ***Stefan W. Schneider****, Privatdozent an der Universität Münster, promovierte 1994 in Medizin an der Universität Würzburg. Er untersucht die Prozesse mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie.*

Simulierte Zellen



Schon die einfachste lebende Zelle ist so komplex, dass selbst Supercomputer ihr Verhalten wohl nie perfekt simulieren können. Aber auch unvollkommene Modelle könnten bereits die Grundlagen der Biologie erschüttern – und hoffentlich Medikamente entwickeln helfen.

Von W. Wayt Gibbs

Drei Jahrhunderte Reduktionismus in der Biologie haben vor kurzem ihren absoluten Höhepunkt erreicht. Der Drang der Wissenschaftler, das Leben in immer kleinere Stücke zu zerteilen – Organismen in Organe, Gewebe in Zellen, Chromosomen in DNA, DNA in Gene –, ist an seine natürliche Grenze gestoßen. Die Strickleiter des menschlichen Genoms ist, mit Einschränkungen, Sprosse für Sprosse bekannt.

Noch bevor im vergangenen Februar die vorläufige Fassung der Sequenz vorlag, begannen Forscher mit dem Hang zum Philosophischen vorauszuschauen in die nächste große Phase der Biologie: die Ära des Integrationismus. Nachdem die biochemischen Einzelinformationen bereitliegen, gilt es sie in eine vollständige Theorie einzuordnen. Zweifellos werden dabei Computer-Modelle eine sehr wichtige Rolle spielen. Doch wie man diese Werkzeuge am besten einsetzt, darüber sind sich die Forscher offenbar noch nicht einig, denn sie entwickeln völlig verschiedene „virtuelle Zellen“.

„Wir haben die komplette Teile-Liste für einen Menschen. Die Leute stellen sich vor, dass man jetzt nur noch die Teile in einem Computer zusammensetzen und den Schalter umlegen muss“, sagt Drew Endy vom Institut für Molekularwissenschaften der Universität von Kalifornien in Berkeley. Dann sollten sich auch die letzten komplizierten Geheimnisse der Medizin lüften. „Doch nichts ist weiter von der Wahrheit entfernt.“

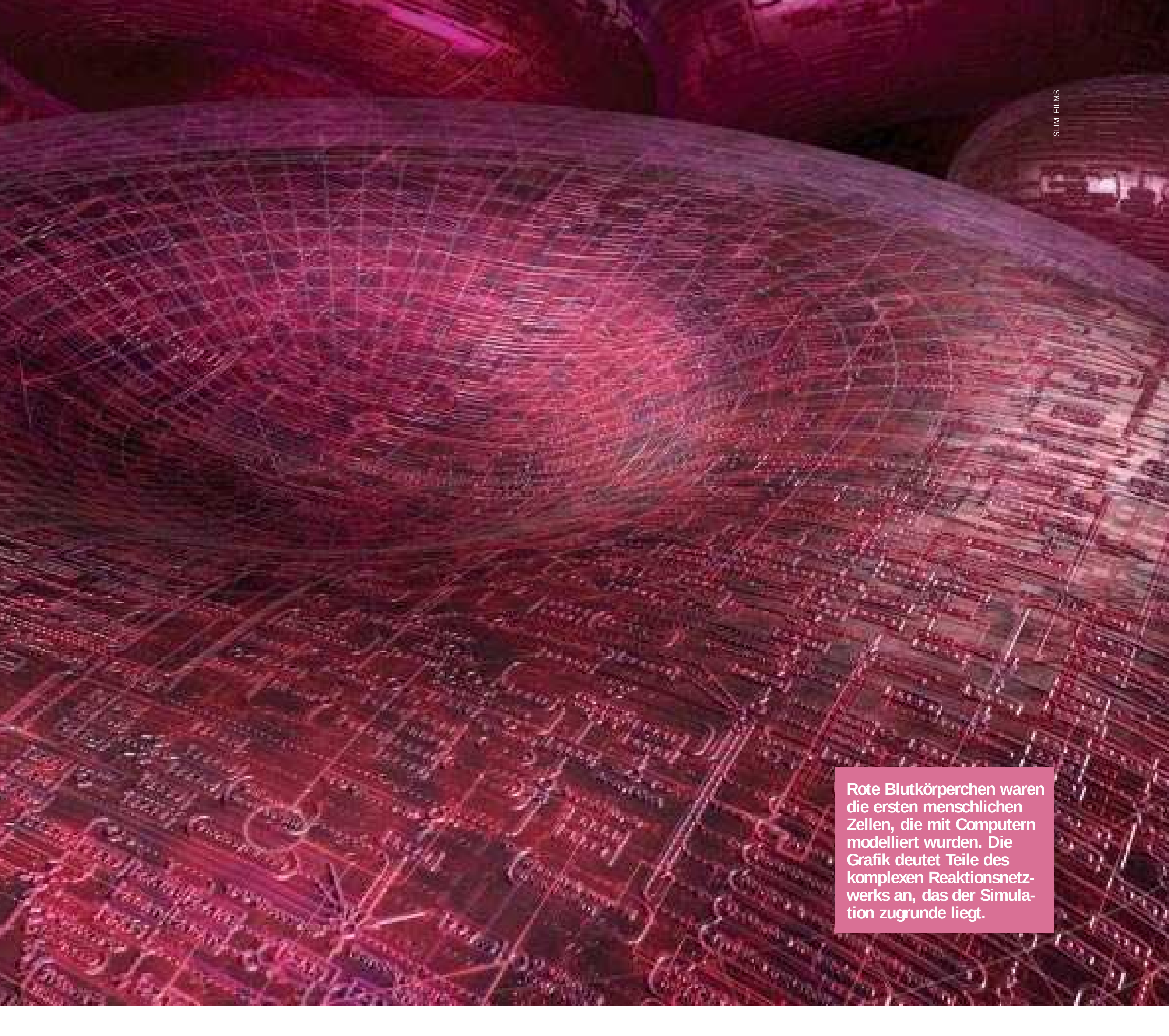
Endy spricht aus bitterer Erfahrung. 1994 begannen er und John Yin von der Universität von Wisconsin in Madison, ein Computermodell des Bakteriophagen T7 zu programmieren. T7 ist ein Virus, das aussieht wie eine Mondfähre. Es vermehrt sich in Bakterien, insbesondere in *Escherichia coli*, den Bewohnern des menschlichen Darms. Dazu krallt es sich mit klauenartigen Anhängen in der äußeren Wand des Bakteriums fest und injiziert seine DNA in dessen Inneres. Das genetische Material bemächtigt sich des Vermehrungsapparats der Zelle und zwingt ihn, so lange Bakteriophagen-Klone herzustellen, bis die Zelle platzt.

Das Computermodell von Endy und Yin simulierte mathematisch, wie die 56 Virus-Gene in 59 Proteine übersetzt werden, wie diese Proteine die Wirtszelle überwältigen und sogar, wie die Viruspartikel Resistenz gegen zahlreiche Medikamente aus RNA entwickeln können. Das erscheint beeindruckend. Aber bei einem detaillierten Blick auf die Gleichungen ist Endy nicht zufrieden. Zwar stecken in ihnen Messergebnisse aus 15 Jahren Laborexperimenten, aber „es gibt immer noch eine riesige Anzahl von unbestimmten Variablen“. Die Gleichungen können so hingebogen werden, dass sie nahezu jedes Verhalten produzieren. „Ein nützliches Modell führt zu einer Hypothese, die den Schöpfer des Modells dazu zwingt, ein Experiment zu machen“, sagt Endy. Sein eigenes Modell leistete das nicht.

Ein zentrales Dogma wankt

Viele frühe Versuche, Leben im Computer nachzubilden, hatten dieselbe Schwäche. Daher benutzen die meisten Biologen Computer immer noch im Wesentlichen als Behälter für den Datenschwall, der ihren Sequenzier-Robotern und Genchip-Lesegeräten entströmt. Die „Modelle“, die sie in ihren wissenschaftlichen Arbeiten veröffentlichen, sind grobe Skizzen mit magerer theoretischer Grundlage. Aber es gibt eben keine bessere Theorie als das zentrale Dogma, dass ein DNA-Gen in eine RNA umgesetzt wird, die in ein Protein übersetzt wird, das eine bestimmte biochemische Funktion erfüllt.

Ausgerechnet dieser Lehrsatz wird seit einigen Jahren von einer wachsenden Schar mathematisch orientierter Biologen als unzulässig vereinfachend in Frage gestellt. Computersimulationen sollen



Rote Blutkörperchen waren die ersten menschlichen Zellen, die mit Computern modelliert wurden. Die Grafik deutet Teile des komplexen Reaktionsnetzwerks an, das der Simulation zugrunde liegt.

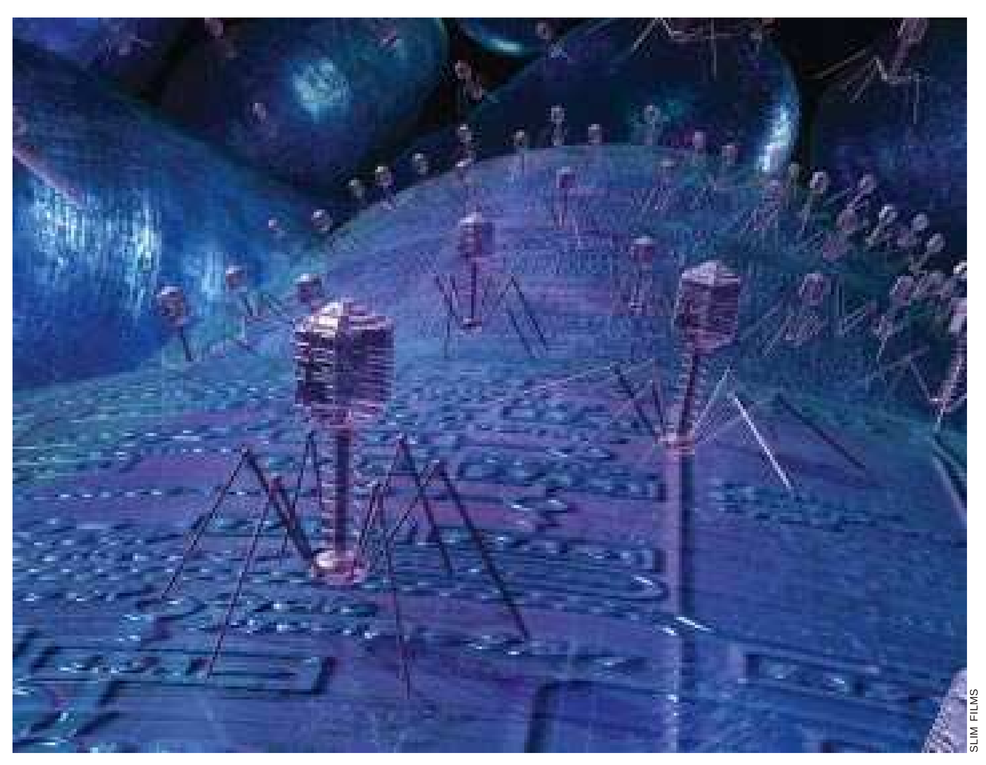
eine bessere Theorie finden helfen. „Wir sind in der Biologie Zeugen einer großen wissenschaftlichen Revolution“, behauptet Bernhard Ø. Palsson, Leiter der Forschungsgruppe für genetische Schaltkreise an der Universität von Kalifornien in San Diego. Palsson ist Mitbegründer von Genomatica, einer der Firmen, die Computer-Modelle von Zellen entwickeln. Mit den Modellen sollen die Irrwege vermieden werden, welche die Entwicklung von Arzneimitteln so aufwendig machen.

In der Tat: „Die Kosten für die Entdeckung neuer Wirkstoffe steigen“, sagt James E. Bailey vom Institut für Biotechnologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Milliardeninvestitionen für monoklonale Antikörper, Klonen, Sequenzierung, kombinatorische Chemie und Roboter haben sich nicht wie erhofft ausgezahlt. Bailey nennt auch die Ursache dafür: „Diese Techniken beruhen auf der naiven Annahme, man könne die Aktivität einer Zelle nach Belieben lenken, indem man einen Wirkstoff hineinschickt, der ein einziges Protein hemmt.“ Nach dem zentralen Dogma sollte das fast immer funktionieren. Aber in neun von zehn Fällen ist das nicht der Fall.

Genetiker haben viele hundert Stämme von Bakterien und Mäusen geschaffen, bei denen ein einziges Gen defekt ist. Die meisten dieser „Knockout“-Organismen zeigen jedoch keine merklichen Ausfälle. Das zentrale Dogma kann auch nicht leicht erklären, wie nur 30 000 Gene das komplexe Verhalten einer Myriade menschlicher Zelltypen hervorbringen.

Alfred G. Gilman, Biochemiker und Nobelpreisträger am Southwestern Medical Center der Universität von Texas in Dallas, beschreibt das Problem so: „Ich könnte Ihnen alle Bestandteile einer Zelle in eine Karte zeichnen, und für jede Beziehung zwischen ihnen den zugehörigen Pfeil. Aber niemand könnte mit Hilfe der Karte das Geringste vorhersagen, auch nicht für den einfachsten einzelligen Mikroorganismus.“

Bailey vergleicht den konfusen Zustand der Mikrobiologie mit der Astronomie im 16. Jahrhundert: „Die Astronomen verfügten über große Archive mit genauen Angaben zur Bewegung und Position von Himmelsobjekten. Aber sie konnten die Bewegungen der Planeten nicht genau vorhersagen. Sie hätten nie geglaubt, dass ihre Bahnen elliptisch und durch eine einfache Gleichung beschreibbar sind. Dann kam Kepler und bewies ▶


SLIM FILMS

Ein Angriff von T7-Bakteriophagen auf *Escherichia-coli*-Bakterien wurde, wie hier symbolisch dargestellt, mit Hilfe einer detaillierten Computer-Simulation untersucht.

genau das. Ich behaupte nicht, dass es eine einfache Gleichung für die Biologie einer Zelle gibt. Aber wir sollten nach Prinzipien Ausschau halten, die unsere Fakten ordnen und verständlich machen.“

Aus den weiterentwickelten Zellsimulationen, an denen gerade gearbeitet wird, zeichnet sich ein erstes solches Prinzip ab: Robustheit. Alles Leben muss mit dramatischen Ausschlägen der Temperatur, wechselndem Futterangebot, giftigen Chemikalien und Attacken von innen wie von außen zurechtkommen. Um zu überleben und zu gedeihen, müssen Zellen über Notfall-Systeme und Regelkreise verfügen, die Störungen abfangen.

Diese Eigenschaft kristallisierte sich bei virtuellen Experimenten heraus, die Masaru Tomita mit seinem Modell „E-Cell“ anstellte. Mit Kollegen des Labors für Bioinformatik an der Keio-Universität in Fujisawa (Japan) baute Tomita diese virtuelle Zelle aus 127 Genen zusammen. Die meisten davon waren denen von *Mycoplasma genitalium*, einer einzelligen Mikrobe, nachgebildet. Sie hat das kleinste Genom, das man bei einer sich selbstständig vermehrenden Lebensform entdeckt hat. Das Fernziel des Teams ist es, die minimale Zahl von Genen zu finden, die ein autarker Organismus haben muss, und ihn dann künstlich herzustellen – eine äußerst reduktionistische Strategie. Aber Tomita war überrascht, als er das Aktivitätsniveau verschiedener Gene im Modell um einige Größenordnungen veränderte: Das Verhalten der E-Cell blieb nahezu unverändert.

„Das war auch für uns eine interessante Entdeckung“, sagt Jeff K. Trimmer, Biowissenschaftler bei Entelos. Die Firma aus Menlo Park (Kalifornien) hat ein Modell einer menschlichen Fettzelle entwickelt sowie Modelle des gesamten menschlichen Organismus, welche die Reaktionen von fettleibigen Patienten und Diabetikern auf Diäten und Medikamenten-Behandlung simulieren. Im Auftrag von Pharmafirmen wie Eli Lilly, Bristol-Myers Squibb und Johnson & Johnson ordnet Entelos deren Kandidaten für Wirkstoffe nach Erfolgsaussichten. Aber wenn Entelos-Wissenschaftler die Wirkung einer solchen Substanz auf die virtuellen Zellen untersuchen, stoßen sie auf Überraschungen: „Auch eine dramatische Veränderung im Zustand der Zelle hat oft wenig Auswirkungen auf das Krankheitsbild“, sagt Trimmer.

Verschiedene modellbauende Biologen hegen einen Verdacht: Nicht die Aktivierung eines Gens oder die Blockierung eines Proteins entscheidet, wie eine Zelle auf einen Wirkstoff oder eine Krankheit reagiert. Es kommt vielmehr darauf an, wie die Gene und Proteine insgesamt miteinander wechselwirken.

Zeichnen wir für jedes Gen oder Protein einen Punkt und immer dann einen Strich zwischen zwei Punkten, wenn die zugehörigen Gene oder Proteine miteinander reagieren, dann ist das Geschehen in der Zelle wie ein sehr abstrakter Film, in dem fortwährend Striche auftauchen und verschwinden. Nur wissen die Modellbauer bei den meisten biologischen Systemen nicht, wann sie wo ihre Striche ziehen sollen.

John R. Koza von der Universität Stanford führte vor kurzem ein Experiment durch, das dieser Not abhelfen könnte. Koza ist Pionier im genetischen Programmieren (Spektrum der Wissenschaft 9/1992, S. 44): Er weist den Computer an, zufällig Programme zu erzeugen und sie immer wieder geringfügig zu verändern. Unter den veränderten Programmen überleben diejenigen, welche von ihnen die vorgegebene Aufgabe am besten erfüllen; alle anderen werden gelöscht. Kozas Programm ist in einem doppelten Sinne genetisch: Es soll nach einem genetischen Algorithmus ein kleines, aber kompliziertes Teil des E-Cell-Modells von Grund auf neu erstellen; dieses wiederum soll das Verhalten von Genen beschreiben.

Eine der Aufgaben war, aus bekannten Enzymen eine chemische Maschine zusammenzustellen, die Fettsäuren und Glyzerin zu Diacylglyzerin umwandelt. Jede Variante der Programme, die für diese Aufgabe „gezüchtet“ wurden, wurde der Einfachheit halber auf einen äquivalenten elektronischen Schaltkreis abgebildet und dessen Verhalten mit einem kommerziellen Schaltkreis-Simulator durchgerechnet.

STECKBRIEF

➤ Biologen haben die Erbsubstanz vieler einfacher Mikroorganismen sequenziert. Aber das sagt ihnen noch nicht, wie diese Zellen auf Medikamente oder externe Reize reagieren: Zu viele Variablen sind noch unbestimmt.

➤ Einige Computer-Modelle ganzer Zellen sind darauf angelegt, alle wichtigen chemischen Reaktionen innerhalb der Zelle mathematisch zu beschreiben. Andere Ansätze versuchen stattdessen, aus grundlegenden chemischen, physikalischen und biologischen Prinzipien möglichst viel über das Verhalten der Zelle herzuleiten.

➤ Fernziel sind Computersimulationen mit „virtuellen Zellen“, die schneller und billiger Aussagen über die Wirksamkeit neuer Medikamente liefern.

Die Simulation ganzer Zellen – aktuelle Projekte

Die **Genetic Circuit Research Group** unter Leitung von Bernhard Ø. Palsson (Bild unten) von der Universität von Kalifornien in San Diego erstellt auf der Grundlage genetischer Information Modelle von *Escherichia coli, Haemophilus influenzae, Helicobacter pylori* und anderen Krankheitserregern.

E-Cell ist eine mathematische Mikrobe aus Genen von *Mycoplasma genitalium*, gebaut im Labor für Bioinformatik an der Keio-Universität in Japan.

Virtual Cell ist ein allgemeines Programmpaket zur Zell-Simulation, erstellt von der National Resource for Cell Analysis and Modeling am Health Center der Universität von Connecticut.

MCell ist eine Supercomputer-Simulation der Synapse zwischen einer Nervenzelle und einer Muskelzelle, entwickelt am Salk Institute und dem Pittsburgh Supercomputing Center.

In Silico Cell, entworfen von Physiome Sciences in Princeton (New Jersey), ist in CellML geschrieben. Das Unternehmen will diese Programmiersprache als Standard etablieren, sodass Wissenschaftler ihre Zellmodelle gemeinsam benutzen und kombinieren können.

Microbial Cell Project, ein Zehn-Jahres-Programm, das vom US-Energieministerium mit 15 Millionen Dollar pro Jahr gefördert wird, soll einzellige Organismen auf molekularer Ebene analysieren und Modelle ihrer Biochemie entwerfen.



JAMES ARONOVSKY

Genetiker Bernhard Ø. Palsson

Nach einem Tag spuckte Kozas Supercomputer Beowulf, eine Spezialanfertigung aus tausend Prozessoren, ein Programm aus, das dem echten Reaktions-Netz glich. Vier Enzyme, fünf Zwischenprodukte, sämtliche Rückkopplungsschleifen und sogar die Reaktionsgeschwindigkeiten jedes Enzyms waren korrekt wiedergegeben. Es gab nur diese eine „richtige“ Antwort; keine andere Anordnung funktionierte annähernd so gut.

Nach Kozas Überzeugung sind mit genetischem Programmieren auch größere Probleme zu bewältigen. Vielleicht können die evolvierenden Programme eines Tages die verschlungenen Pfade nachvollziehen, auf denen Zellen ihre Nahrung in Energie, Wachstum und Abfall verwandeln. Die Methode wird aber nur funktionieren, wenn Messwerte über den Stoffumsatz echter Zellen im Verlauf der Zeit vorliegen. Solche Daten sind immer noch rar.

Palsson und seine Kollegen nutzen die Erkenntnis, dass viele biochemische Probleme eine optimale Lösung haben, für ihre Modelle von *Escherichia coli*, von dem Grippe-Erreger *Haemophilus influenzae* und von *Helicobacter pylori*, dem Keim, der in Magengeschwüren gefunden wird. Mit Daten, die sie in der Literatur zusammensuchen, bilden sie die biochemischen Reaktionsnetze möglichst genau ab. Auf Basis dieses Wissens berechnen die Forscher zunächst eine Lösung ohne Rücksicht auf physikalische Gesetze. „Dann unterwerfen wir sie Nebenbedingungen“, erklärt Palsson. Zum Beispiel muss die Masse erhalten bleiben. Elektrische Ladungen müssen sich kompensieren, und die Thermodynamik macht viele Reaktionen irreversibel. Die Forscher nähern sich der physikalisch korrekten Lösung in vielen kleinen Schritten, indem sie die physikalischen Gesetze allmählich in Kraft setzen.

Markus W. Covert aus Palssons Labor sagt, das Ziel sei nicht perfekte Vorhersage, sondern verlässliche Annäherung: „Ingenieure können ein Flugzeug im Computer konstruieren und testen. Dabei kommen sie praktisch ohne Prototyp aus, obwohl sie die Luftströmungen nicht genau berechnen können.“ Eine von Palssons Team erstellte Simulation sagte richtig voraus, dass *E. coli* auf Wachstum optimiert ist und nicht auf Energieproduktion.

Dieses Prinzip, das immer mehr Anhänger gewinnt, wird mit *top-down* bezeichnet: nicht aus Einzelinformationen das Gesamtsystem rekonstruieren (das wäre *bottom-up*), sondern aus der globalen Betrachtung Details erschließen. Gilman ist Vorsitzender der Alliance for Cellular Signaling. Dieser Verbund mehrerer Universitäten hat Forschungsmittel aus dem Bundeshaushalt der USA zugesagt bekommen, um Herzmuskel-Zellen und B-Zellen (entscheidende Zellen des Immunsystems) zu modellieren. Gilman schätzt die Laufzeit des Projekts auf zehn Jahre, bei Kosten von zehn Millionen Dollar pro Jahr. „Aber wenn wir diese Art von Modellen haben“, sagt Gilman, „wird das die unglaublichste Medikamenten-Entdeckungs-Maschine aller Zeiten sein. Man könnte Krankheiten nachbilden und dann ausloten, was durch chemische Veränderung von Medikamenten zu erreichen wäre. Das wird wahrscheinlich länger dauern als zehn Jahre. Ich zweifle aber nicht daran, dass es quantitative Modelle der Zellfunktion geben wird, später für ganze Organe und schließlich für ganze Tiere.“

„Ich würde ein solches Ziel mit einer gehörigen Portion Bescheidenheit angehen“, warnt Skeptiker Bailey. „Die Vergangenheit hat gezeigt, dass Simulationen helfen können, spezielle Fragen zu untersuchen. Aber es wird kein übergreifendes Modell geben, das alle Fragen beantwortet. Am Ende werden die Modelle so kompliziert sein wie die Zelle selbst – und genau so schwer zu verstehen.“

Es sei denn, der nächste Kepler wäre ein Informatiker. ■

Literaturhinweise

Modelling Cellular Behaviour. Von Drew Endy und Roger Brent in: Nature, Bd. 409, S. 391, 18. Januar 2001.

Whole-Cell Simulation: A Grand Challenge of the 21st Century. Von Masaru Tomita in: Trends in Biotechnology, Bd. 19, Heft 6, S. 205, Juni 2001.

W. Wayt Gibbs *ist Redakteur bei Scientific American.*

MIKROBIOLOGIE

Bekämpfung bakte

Für einige der hartnäckigsten Infektionskrankheiten sind Biofilme, gut organisierte Verbände von Bakterien, verantwortlich. Wer ihnen beikommen will, muss das Kommunikationssystem dieser Mikroben ausspionieren.

Von J. W. Costerton und Philip S. Stewart

Ohne Kommunikation kann keine menschliche Gemeinschaft funktionieren; sie ist einer der Lebensnerven unseres Zusammenlebens. Nicht anders verhält es sich bei Bakteriengemeinschaften.

Etliche bakterielle Infektionen sind schwer zu kurieren, weil ihre Erreger sich großflächig zu komplexen, widerstandsfähigen Verbänden zusammenschließen. Diesen so genannten Biofilmen kann eine traditionelle Antibiotika-Behandlung kaum mehr etwas anhaben. Die Mikroben errichten und unterhalten ihr Bollwerk, indem sie sich über Botenstoffe verständigen. Diese vergleichsweise junge Erkenntnis offenbart aber zugleich die Schwachstelle im System: Gäbe es Medikamente, die diese Informationsübermittlung stören, ließen sich vermutlich Zusammenschlüsse verhindern oder bereits etablierte Bastionen unterminieren. Nützlich wären solche Mittel gegen diverse Erkrankungen: von den hartnäckigen Lungenentzündungen, die immer wieder Mukoviszidose-Patienten heimsuchen, bis zu den schleichenden Infektionen, die sich oft an den Oberflächen von Implantaten bilden.

Zurzeit werden Wirkstoffe, welche die Übermittlung entscheidender bakterieller Signale stören, in Tierversuchen erprobt. Warum aber wurde dieser elegante Ansatz nicht schon längst verfolgt, um unser medizinisches Arsenal aufzustocken? Im Grunde liegt es daran, dass die Mikrobiologen den Feind lange Zeit massiv unterschätzt haben. Seit Robert Koch im späten 19. Jahrhundert mit seinen Laboruntersuchungen eindeutig nachwies, dass Mikroben die Ursache vieler Krankheiten sind, stellen sich die meisten Menschen – selbst Naturwissenschaftler – Bakterien als einzelne Zellen vor, die frei im Wasser oder einer Körperflüssigkeit treiben oder aktiv schwimmen. Dieses schiefe Bild resultierte aus der üblichen Untersuchungsmethode der ▶

STECKBRIEF

- ➤ Ein kostspieliges Problem für das Gesundheitswesen und die Industrie stellen Bakterien dar, die von einer vagabundierenden zu einer sesshaften Lebensweise übergehen. Sie schließen sich zu Wohngemeinschaften zusammen, deren gemeinsames Merkmal ein gallertiger Schutzfilm ist.
- ➤ In diesen Biofilmen entwickeln die Mikroben andere Eigenschaften, werden beispielsweise extrem widerstandsfähig gegen Antibiotika und Desinfektionsmittel.
- ➤ Biofilme bilden sich nach neueren Erkenntnissen allerdings nur, wenn der Informationsaustausch zwischen den Bakterien funktioniert. Forscher arbeiten daher an Substanzen, die das „E-Mail-Netz“ der Mikroben lahm legen.



Auf Kontaktlinsen (rechts) können sich Biofilme ausbreiten – Kolonien von schleimumhüllten Mikroorganismen, die auf Oberflächen siedeln. Der im Ausschnitt vergrößerte Biofilm wuchs ebenfalls auf einer Kontaktlinse und war wahrscheinlich für die Hornhautentzündung ihres Trägers verantwortlich.

rieller Biofilme

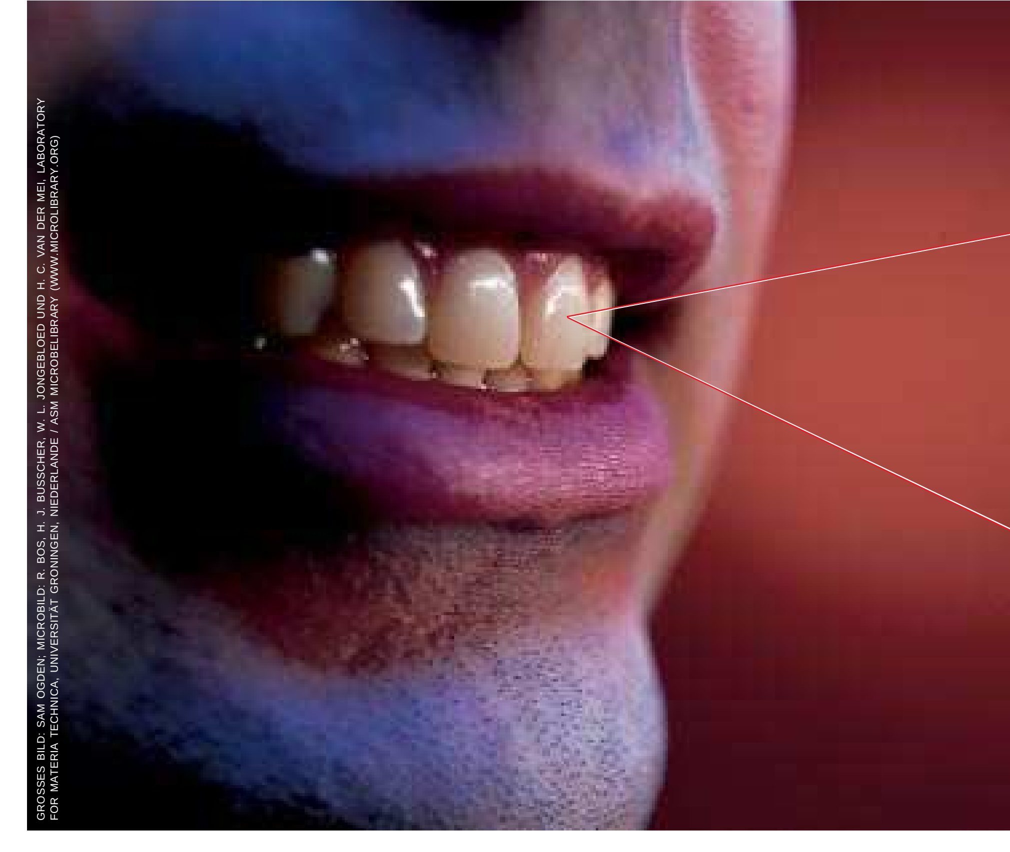


GROSSES BILD: SAM OGDEN; MIKROBILD: LOUISE MCLAUGHLIN-BORLACE, INSTITUTE OF OPHTHALMOLOGY, ABTLG. PATHOLOGIE, LONDON /ASM MICROBELIBRARY (WWW.MICROLIBRARY.ORG)

Forscher: Zum Beobachten legten sie unter ihr Mikroskop einen Objektträger mit einem Tropfen des Nährmediums, und darin schwebten die kultivierten Zellen. Das war zwar praktisch, verleitete aber zu Fehlschlüssen, denn diese Kulturbedingungen haben mit der normalen Umwelt der Mikroben meist nicht viel gemein. Folglich verhalten sich Bakterien in klassischen Laborkulturen oft völlig anders als in der freien Natur.

In den letzten Jahren haben wir und andere Bakteriologen viel über die tatsächliche Lebensweise der häufigsten krankheitserregenden Mikroben in Erfahrung gebracht. Wir entdeckten, dass viele dieser Organismen den kleinsten Teil ihrer Zeit als frei schwebende Einzelzellen verbringen. Vielmehr heften sie sich gerne an alle möglichen benetzten Oberflächen an, bilden dort Kolonien und schließen sich zu einer erstaunlichen Vielfalt von Lebensgemeinschaften zusammen.

Rückblickend erscheint es unglaublich, dass diese mikrobielle Lebensweise dem Auge der Forscher so lange entgehen konnte. Immerhin kommen Bakterien-Biofilme fast überall vor: Der lästige Zahnbelag, der glitschige Überzug eines Flusskiesels sowie die unvermeidliche Schleimschicht, die sich nach zwei, drei Tagen in jeder Blumenvase breit macht – all dies sind nur ein paar gängige Beispiele. Zwar haben wir uns auf die Untersuchung von Bakterien konzentriert, aber auch andere Mikroorganismen können Biofilme bilden. Gerade das breite genetische Spektrum der Zellen, die solche lebenden Überzüge bilden, und die Vielfalt von Nischen, die sie so erobern können, haben uns davon überzeugt, dass es sich bei dieser Fähigkeit um eine uralte Überlebensstrategie der Mikroben handelt – von der Wissenschaft aber bis in neuere Zeit schlichtweg verkannt.


GROSSES BILD: SAM OGDEN; MICROBILD: R. BOS, H. J. BUSSCHER, W. L. JONGEBLOED UND H. C. VAN DER MEI, LABORATORY FOR MATERIA TECHNICA, UNIVERSITÄT GRONINGEN, NIEDERLANDE / ASM MICROBELIBRARY (WWW.MICROLIBRARY.ORG)

Auch gewöhnlicher Zahnbelag ist ein Biofilm. Die Plaque-Bakterien scheinen sogar für Herzerkrankungen mitverantwortlich zu sein.

Natürlich hatten einige Forscher schon viel früher versucht, die in Biofilmen lebenden Bakterien lichtmikroskopisch zu studieren. Die Mikroben an der Oberfläche konnten sie zwar gut erkennen. Da aber aus dem Inneren der Schichten keine klaren Bilder zu bekommen waren, nahmen sie an, die Zellen dort wären großenteils längst abgestorben und lägen bloß zusammengewürfelt herum. Auch das Elektronenmikroskop, mit dem einige Forscher es später versuchten, brachte kaum mehr Aufschluss. Zellen lassen sich darin nicht lebend beobachten.

Die falsche Sicht hielt sich fast unverändert bis vor etwa zehn Jahren. Die Wende brachte eine neue Technik: die konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie. Sie ermöglicht das Anfertigen optischer Schnitte in unterschiedlichen Tiefen innerhalb eines lebenden, intakten Biofilms. Diese zweidimensionalen Bilder lassen sich dann zu einer dreidimensionalen Darstellung „übereinander stapeln".

Mit dieser Methode entdeckten 1991 drei Forscher gemeinsam – John R. Lawrence vom kanadischen Nationalen Wasserforschungsinstitut, Douglas E. Caldwell von der University of Saskatchewan (Kanada) und einer von uns (Costerton) –, dass die Bakterien innerhalb des Films in winzigen Enklaven leben. In diesen Mikrokolonien, wie wir sie nannten, machen die Bakterien selbst aber gewöhnlich nicht einmal ein Drittel von allem aus. Der Rest besteht aus einer zähen von den Zellen abgesonderten Masse, die viel Wasser absorbiert und kleine Partikel einfängt.

Dieser schleimige Kleber – Fachleute sprechen von extrazellulärer Matrix – hält eine Mikrokolonie zusammen. Zwischen den zahllosen Enklaven in einem Biofilm erstreckt sich ein Netzwerk offener Wasserwege. Durch die winzigen Röhren gelangt Flüssigkeit zu jedem Mikroben-Häufchen, versorgt es mit Nährstoffen und entsorgt seine Stoffwechsel-Abfälle. Die Zellen am Rand kommen voll in den Genuss dieses Luxus; für jene tief im Inneren einer Mikrokolonie wird es dagegen schwieriger: Die dicht besiedelte Peripherie und die organische Matrix, in die sie eingebettet sind, behindern den Wasserdurchfluss.

Invasion durch den Schlauch


SAM OGDEN

Die Biofilme, die sich auf Blasenkathetern bilden, verursachen häufig Infektionen. Bei kurzer Verweildauer ist das Risiko gering, aber es steigt mit der Zeit stark an: Einer Studie von 1996 zufolge sind bereits nach einer Woche zehn bis fünfzig Prozent der Katheter-Patienten infiziert; nach einem Monat sind bei fast allen Keime in die Blase eingewandert.



Daher müssen sich die zentralen Zellen mit den Nährstoffen bescheiden, die per Diffusion bis zu ihnen vordringen. So schlecht wie es aussieht, ist ihre Versorgungslage dennoch nicht: Da der Kleister selbst größtenteils aus Wasser besteht, können sich kleine Moleküle frei in ihm bewegen – allerdings mit einer wichtigen Einschränkung: Eine Substanz, die unterwegs mit den Zellen oder der Matrix reagiert, wird nur schwer zur Mitte vordringen.

Dass sich die Umweltbedingungen für die Zellen im Biofilm kleinräumig unterscheiden, war bereits bekannt, bevor wir mit Hilfe der konfokalen Mikroskopie die Ursache aufdeckten. So hatte 1985 unser Kollege Zbigniew Lewandowski das chemische Milieu in einem Biofilm direkt zu analysieren begonnen, indem er nadelförmige Mikroelektroden einführte, mit nur einem hundertstel Millimeter Dicke an der Spitze. Unter anderem stellte er fest, dass zwei Punkte mit nur fünf hundertstel Millimeter Abstand – das ist gerade einmal Haaresbreite – schon völlig andere Sauerstoffkonzentrationen aufweisen können.

Der Sauerstoffgehalt in einer Bakteriengesellschaft interessiert besonders, da er über den physiologischen Zustand der Zellen Auskunft zu geben vermag. In einem Biofilm beispielsweise, der einzig *Pseudomonas aeruginosa* enthält (den Erreger der Mukoviszidose-Lungenentzündung), können bloß die Zellen im Saum einer jeden Mikrokolonie wachsen und sich teilen. Denn der Sauerstoff dringt nicht tiefer als zwei bis drei hundertstel Millimeter weit ein. Die Zellen tief im Inneren sterben zwar nicht ab, gehen aber in ein Ruhestadium über. Dieses Nebeneinander verschiedener Stoffwechselzustände unterscheidet Biofilme deutlich von typischen Laborkulturen, in denen es allen Zellen in etwa gleich gut oder schlecht geht.

In einem Biofilm, mit seinen vielfältigen chemischen Milieus, kann eine Zelle ganz anders aussehen und sich verhalten als ihre genetisch identische Nachbarin. Außerdem beeinflussen die lokalen Bedingungen die bakterielle Produktion vieler giftiger und anderweitig gesundheitsschädigender Stoffe: Unter Umständen bereiten deshalb manche der Biofilm-Mikroben dem Wirtsorganismus kaum Probleme, während ihre Artgenossen nebenan ein tödliches Gift ausscheiden. Das breite Spektrum an Umweltbedingungen ermöglicht sogar das gedeihliche Zusammenleben mehrerer Bakterienarten in einem Biofilm. Dabei vertilgt manchmal eine Art die Stoffwechselabfälle einer anderen, was für beide von Vorteil ist.

Antibiotika und Desinfektionsmittel sind oft machtlos gegen Biofilme

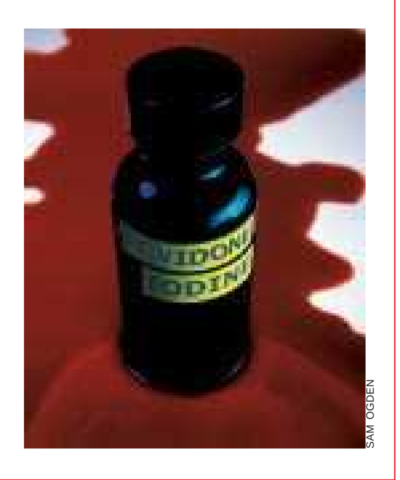
Ein besonders interessantes Beispiel hierfür findet sich im Verdauungstrakt von Rindern und anderen Wiederkäuern. Bereits seit den vierziger Jahren weiß man – zumindest in groben Zügen –, was in deren Eingeweiden abläuft. Auf dem gefressenen Grünzeug bilden sich Biofilme, und zwar zunächst aus Organismen, die pflanzliche Zellulose abbauen und Fettsäuren produzieren. Sobald diese Zellulose zersetzenden Bakterien so viel Fettsäuren ausgeschieden haben, dass sie ihr eigenes Wachstum hemmen, wandern bewegungsfähige Bakterien der Gattung *Treponema* nebst weiteren Arten in den Biofilm ein und verwerten eben diese Fettsäuren als Brennstoff für ihren Stoffwechsel. Das Grünzeug verschwindet allmählich, und die Rinder verdauen schließlich die Schicht, mit der die Futterreste überzogen sind. Die Tiere leben also genau genommen nicht von Heu, sondern von bakteriellen Biofilmen.

Während Wiederkäuer auf Biofilme strikt angewiesen sind, stellen sie für uns ein Ärgernis dar, manchmal sogar eine lebensbedrohliche Gefahr. Was in Medizin und Industrie an Desinfektionsmitteln und Antibiotika eingesetzt wird, kann zwar frei treibende Bakterien wirksam vernichten, aber solchen in Filmen meist nicht viel anhaben. In der extrazellulären Matrix verborgen, entgehen die Keime selbst den Abwehrstoffen und -zellen des Immunsystems. Biofilm-Infektionen sind deshalb oft erschreckend hartnäckig.

Was genau aber macht Biofilme so widerstandsfähig? Öfter gelingt es den Antibiotika und Desinfektionsmitteln erst gar nicht, in die Schicht richtig einzudringen. Penicilline tun sich zum Beispiel sehr schwer mit Biofilmen, deren Zellen so genannte Beta-Lactamasen absondern. Diese Enzyme bauen die Antibiotika schneller ab, als sie durch Diffusion nachgeliefert werden, ▶

Tödliche Arznei

Trotz aufwändiger Sicherheitsvorkehrungen können Biofilm-Bakterien gelegentlich auch in Arzneimittel hineingeraten. In den Jahren 1993 und 1994 starben hundert Asthmatiker, weil sie ein Albuterol-Inhalationspräparat verwendet hatten, das mit filmbildenden Bakterien der Art *Pseudomonas aeruginosa* verunreinigt war. Als Keimquelle entpuppte sich ein Fermenter der Produktionskette. 1989 hatte sich *Pseudomonas cepacia* – ein weiteres bekanntes Biofilm-Bakterium – in Flaschen des Antiseptikums Polyvidon- oder Povidon-Iod angesiedelt und in einem Kinderkrankenhaus in Texas Infektionen ausgelöst.



SAM OGDEN

Wie Biofilme entstehen und was man gegen sie tun kann

Neue Erkenntnisse über Biofilme liefern zugleich Ideen, wie dem Übel vorzubeugen oder es zu bekämpfen wäre. Die üblichen Antibiotika und Desinfektionsmittel scheitern oft, da sie nicht tief genug in die Filme eindringen, nicht gegen alle beteiligten Bakterienarten wirken oder Zellen im Ruhestadium verschonen.

Botenstoff

Bakterien

Matrix

1

Einzelne zunächst frei schwimmende Bakterien lassen sich auf einer Oberfläche nieder, ordnen sich an und setzen sich fest.

Gegenmaßnahme:
Oberflächen mit Molekülen beschichten, die das Andocken verhindern oder die Rangiermanöver der Mikroben stören

2

Die versammelten Zellen beginnen, eine zähe Matrix abzusondern.

Gegenmaßnahme:
Oberflächen mit Substanzen beschichten, welche die Produktion der Matrix beeinträchtigen

3

Die Zellen regen einander zur Vermehrung und Bildung einer Mikrokolonie an.

Gegenmaßnahme:
Botenstoff-Rezeptoren durch andere Moleküle blockieren, um das Entstehen eines Biofilms zu stoppen

4

In dem Konglomerat bildet sich u. a. ein Sauerstoffgefälle aus, was die Koexistenz verschiedener Arten und Stoffwechselformen fördert.

Gegenmaßnahme:
Antibiotika- und Desinfektionsmittel-Cocktails anwenden entsprechend den unterschiedlichen Überlebensstrategien der Biofilm-Zellen

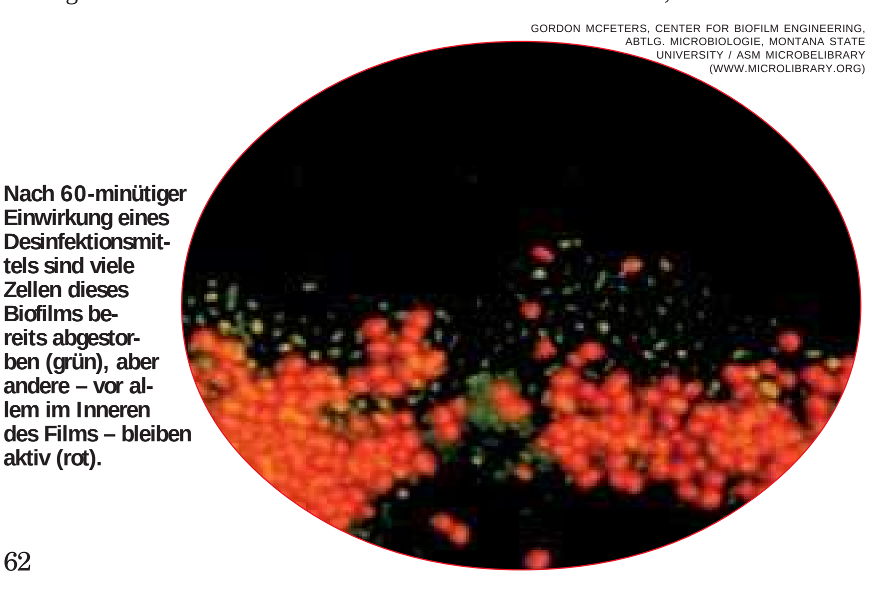
KEITH KASNOT

sodass die tieferen Zonen des Biofilms unbehelligt bleiben. Selbst der in Privathaushalten und der Industrie so beliebte Chlor- oder Bleichkalk hat Probleme. Zwar brennt sich das reaktionsfreudige Oxidationsmittel letzten Endes durch, aber es braucht eine ganze Weile, bis es die neutralisierende Wirkung des Biofilms Schicht um Schicht überwunden hat. Dieser Vorgang erfordert oft mehr Zeit und größere Mengen des Desinfektionsmittels, als der Anwender glaubt. So können noch etliche Zellen am Leben sein, während man sich längst in der Sicherheit wiegt, sie alle erledigt zu haben.

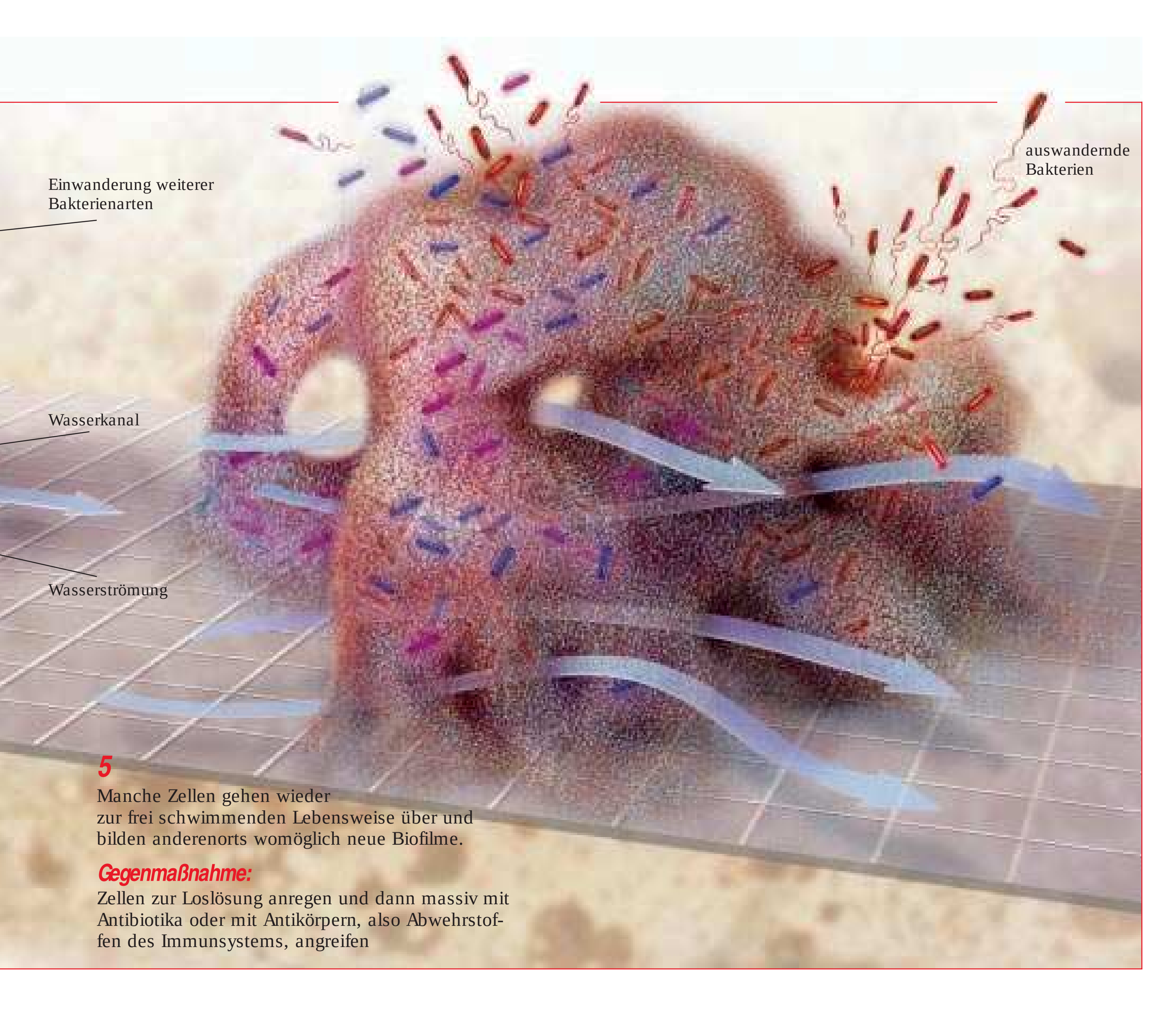
Weitere Faktoren tragen zur Widerstandsfähigkeit bei. Selbst wenn eine antimikrobielle Substanz tief in den Biofilm eindringt, überleben in seinem Schutz oftmals Zellen eine aggressive Behandlung, die „Singles" vernichten würde. Verantwortlich für diese lange rätselhafte Unempfindlichkeit ist die Vielfalt an Umweltbedingungen und Bakterienformen in einem Biofilm.

Betrachten wir noch einmal das Penicillin, das gegen eine Vielzahl von Bakterienarten wirkt. Es setzt bei sich teilenden Zellen an. In einem Biofilm mag es aber Regionen geben, in denen zum Beispiel ein so krasser Mangel an einem essenziellen Nährstoff herrscht, dass die Zellen zwar überleben, sich aber nicht mehr teilen können. Daher vermag das Penicillin ihnen nichts anzuhaben. Da

GORDON MCFETERS, CENTER FOR BIOFILM ENGINEERING, ABTLG. MIKROBIOLOGIE, MONTANA STATE UNIVERSITY / ASM MICROBELIBRARY (WWW.MICROLIBRARY.ORG)



Nach 60-minütiger Einwirkung eines Desinfektionsmittels sind viele Zellen dieses Biofilms bereits abgestorben (grün), aber andere – vor allem im Inneren des Films – bleiben aktiv (rot).



aktive und inaktive Mikroben in einem Biofilm teilweise nah beieinander liegen und da alle abgetöteten Zellen ihren überlebenden Nachbarn als Rohstoffquelle dienen, kann sich der Biofilm aus einer Hand voll überlebender Bakterien binnen weniger Stunden vollständig regenerieren. Das erklärt, warum antimikrobielle Substanzen, die sich in Laborkulturen bewährt haben, beim Einsatz gegen Biofilme oft versagen.

Neben Ärzten und Patienten kämpfen auch viele Ingenieure und Techniker gegen Biofilme: In der Industrie können Bakterien immense Schäden anrichten, indem sie beispielsweise Apparaturen verstopfen oder die Korrosion von Metallrohren beschleunigen. Mit Blick auf beide Interessengruppen errichtete die National Science Foundation der USA 1990 das Engineering Research Center an der Universität des Bundesstaates Montana, an dem wir beide seit fast einem Jahrzehnt zusammenarbeiten. Inzwischen heißt es Center for Biofilm Engineering.

Die Forschungen hier haben unter anderem Verblüffendes ergeben. Ein Beispiel: Wenn Bakterien sich an eine Oberfläche heften und einen Biofilm aufbauen, dann stellen sie Hunderte von Proteinen her, die sie als Singles offenbar nicht produzieren. Einige dieser Eiweißstoffe sind an den eigentümlichen Rangiermanövern beteiligt, die unmittelbar nach dem Andocken an der Oberfläche und vor dem endgültigen Fixieren stattfinden. Das haben Roberto Kolter und seine Mitarbeiter an der Harvard Medical School festgestellt, indem sie bestimmte Protein-Gene aus dem Erbgut von verschiedenen Bakterienarten entfernten. Wieder andere Wissenschaftler haben bei dem weit verbreiteten Krankheitserreger *Staphylococcus epidermidis* jene Gene ausfindig gemacht, die für den nächsten Entwicklungsschritt eines Biofilms zuständig sind: die Synthese der extrazellulären Matrix. Ohne diese Gene kann das Bakte-

Literaturhinweise

Biofilme – die bevorzugte Lebensform der Bakterien. Von Hans-Curt Flemming und Jost Wingender in: Biologie in unserer Zeit, Bd. 31, Nr. 3, S. 169, 2001.

Biofilme – das Leben am Rande der Wasserphase. Von Hans-Curt Flemming in: Nachrichten aus der Chemie, Bd. 48, Nr. 4, S. 442, 2000.

Community Structure and Co-operation in Biofilms. Von D. G. Allison, P. Gilbert, H. M. Lappin-Scott und M. Wilson (Hg.). Cambridge University Press, 2001.

Bacterial Biofilms: A Common Cause of Persistent Infections. Von J. W. Costerton, Philip S. Stewart und E. P. Greenberg in: Science, Bd. 284, S. 1318, 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Korrosionsbeschleuniger



SAM OGDEN

Biofilm-Kolonien, die sich zum Beispiel im Inneren von Metallrohren ansiedeln und dort die Korrosion fördern, können der Industrie sehr zu schaffen machen. Korrosion ist für die Hälfte aller außerplanmäßigen Abschaltungen dampfbetriebener Kraftwerke verantwortlich. Der Kampf mit derartigen Widrigkeiten kostet die Konzerne alljährlich Milliarden.

rium im Reagenzglas und – wie es scheint – auch im Gewebe von Versuchstieren keine Biofilme mehr aufbauen.

Auch bei anderen Bakterienarten wurden in jüngster Zeit ähnliche genetische Steuersysteme dingfest gemacht. So schaltet der Problemkeim *Pseudomonas aeruginosa* schon innerhalb einer Viertelstunde nach dem Andocken mehrere Gene ein. Eines davon, mit dem Kürzel *algC*, ist für die Produktion des gelatinösen Polymers Alginat zuständig, des Hauptbestandteils der extrazellulären Matrix.

Aber woher „wissen“ die Pionier-Zellen, die sich auf einer Oberfläche versammeln, dass sie zur Bildung eines Biofilms bestimmte Gene einschalten müssen? Die Antwort wirft das herkömmliche Bild von Mikroben als primitiven Einzelgängern über den Haufen: Die Zellen stehen untereinander in einem ständigen chemischen Austausch. Bei *Pseudomonas aeruginosa* und einer Vielzahl ähnlicher Bakterien sind die wichtigsten Botenstoffe so genannte Acyl-Homoserinlactone. Sie werden immer in kleinen Mengen abgegeben, und sobald genügend Zellen zusammenkommen, steigt die Stoff-Konzentration so weit an, dass schließlich Dutzende von Genen auf dieses Signal hin ihre Aktivität verändern. Wie David G. Davies von der Universität Binghamton (US-Bundesstaat New York) nachwies, ist dieser Mechanismus, den Fachleute als Quorum-Wahrnehmung bezeichnen, ein Schlüsselelement für die Biofilm-Entwicklung. (Unter „Quorum“ versteht man unter anderem die zur Beschlussfähigkeit vorgeschriebene Anzahl abgegebener Stimmen.) Zum Beispiel können Laborstämme von *Pseudomonas aeruginosa*, denen das Gen für ein bestimmtes Acyl-Homoserinlacton fehlt, keine normalen Biofilme aufbauen; sie türmen sich einfach zu unorganisierten Zellhaufen auf.

Mittlerweile haben Forscher auch Kommunikationsmittel jener Bakterien identifiziert, die in den Biofilmen von Blasenkathetern und Ähnlichem wachsen. Zusammen mit filmbildenden Mikroben auf Implantaten verursachen sie die problematischsten Infektionen dieses Typs überhaupt; allein in den Vereinigten Staaten sind jedes Jahr schätzungsweise zehn Millionen Menschen betroffen. Diese Infektionen entwickeln sich in der Regel schleichend, können aber immer wieder heftig aufflackern und sind äußerst schwer loszuwerden. Auch für Zahnbetterkrankungen, Prostata-Infektionen, Nierensteine, Tuberkulose, die Legionärskrankheit und einige Formen der Mittelohrentzündung sollen Biofilme zumindest mitverantwortlich sein.

Dank der nun gewonnenen biologischen Erkenntnisse sollte es aber möglich sein, die Schwachstellen von filmbildenden Bakterien auszunützen und dort gezielt mit neuen Medikamenten anzugreifen. Hier einige Beispiele:

➤ Man überschwemme die klebrigen „Enterhaken“ auf den Zellen mit einer Substanz, die sich leicht diesen fädigen Strukturen anlagert und damit die Adhäsion der Bakterien an Oberflächen erschwert. Ohne Adhäsion kann erst gar kein Film entstehen.

➤ Man störe die Synthese der extrazellulären Matrix, indem man zum Beispiel medizinische Implantate mit Stoffen beschichtet, welche die Gene für die Matrix-Produktion ausschalten.

➤ Man blockiere Botenstoffe, mit denen die Bakterien kommunizieren, um das Biofilm-Wachstum oder zumindest die Giftproduktion und andere schädliche Vorgänge zu stoppen.

Die bisher versuchte Strategie, die Krankheitserreger durch massive Gabe von Antibiotika auszuknocken, vernichtet notgedrungen auch eine Menge harmloser oder sogar nützlicher Bakterien.

Brunnenvergifter



SAM OGDEN

Die Reinheit des Trinkwassers kann durch Biofilme bedroht werden, die im Inneren der Versorgungsleitungen gedeihen. Dank ihrer zähen Schutzschicht vermehren sich die Mikroorganismen trotz Chlorierung. So haben Wissenschaftler der Stanford-Universität herausgefunden, dass der Cholera-Erreger *Vibrio cholerae* Biofilme bilden und so Chlor-Konzentrationen überleben kann, die 10- bis 20-mal über dem trinkwasserüblichen Wert liegen. 1996 war das Trinkwasser der Bundeshauptstadt Washington aufgrund von Biofilmen mehrmals so stark bakteriell kontaminiert, dass seine Keimzahl den bundesbehördlichen Grenzwert überschritt.

Hoffnung, dass dies auch bei filmbildenden Mikroben so bleibt, die medizinisch eingesetzte Materialien und menschliche Gewebe besiedeln.

All diese Forschungen bewegen noch etwas ganz anderes, das vielleicht keinen so unmittelbaren Nutzwert hat, sich aber letzten Endes als nicht minder bedeutsam erweisen könnte: Sie revolutionieren unser traditionelles Bakterien-Bild. Unter Biologen wird die Biofilm-Bildung mehr und mehr als Entwicklungsvorgang verstanden und mit einer Begrifflichkeit beschrieben, die aus der Embryologie entlehnt ist. So wie aus einer befruchteten Eizelle ein Organismus mit unterschiedlichsten Zelltypen entsteht, so differenzieren sich auch Bakterien, sobald sie sich auf einer Oberfläche niedergelassen haben. Sie synthetisieren Botenstoffe mit ähnlichen Aufgaben wie die Pheromone und Hormone der Insekten und Säugetiere. Und über diese Kommunikation koordinieren sie den Aufbau von Mikrokolonien mit ihrem raffinierten architektonischen Umfeld. Das angelegte System, das den Zufluss von Nährstoffen und den Abtransport von Abfällen ermöglicht, weckt Assoziationen zum Kreislaufsystem höherer Organismen. In manchen Biofilmen arbeiten sogar viele Arten von Bakterien zusammen, um eine Nahrungsquelle zu erschließen, die eine Art allein nicht so effektiv ausbeuten könnte.

Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass Bakterien keineswegs die primitiven Geschöpfe sind, als die sie den meisten Biologen seit jeher galten. Fazit: Wir müssen ihnen im System der Lebensformen womöglich einen viel höheren Rang zubilligen, als wir uns das bislang vorstellen konnten. ■

Schon bald werden nun aber die schädlichen Aktivitäten solcher Zellen auf subtilere Weise zu unterbinden sein.

Ein neuartiger Wirkstoff, allerdings für einen etwas anderen Einsatzbereich, ist bereits auf dem Weg zur Marktreife: 1995 war Staffan Kjelleberg und Peter Steinberg von der Universität von New South Wales in Sydney (Australien) aufgefallen, dass die Rotalge *Delisea pulchra* in der Botany Bay nur selten von Biofilmen besiedelt ist. Obwohl dort im Meer Tausende von Bakterienarten vorkommen, bleiben die Pflanzen sauber. Wie schaffen sie das? Wie Kjelleberg und Steinberg feststellten, unterdrückt diese Rotalge mit so genannten substituierten „Furanonen“ die Bildung von Biofilmen. Die beiden Wissenschaftler und ihre Universität haben daraufhin die Firma „Biosignal“ gegründet, um mit diesen Verbindungen Anti-Biofilmbeschichtungen für Schiffsrümpfe und Aquakultur-Anlagen zu entwickeln.

Kürzlich hat Bonnie L. Bassler von der Universität Princeton eine weitere Klasse von Molekülen beschrieben, die praktisch alle Bakterien als zwischenartliches Kommunikationsmittel verwenden. Die Furanone aus den Rotalgen ähneln chemisch sowohl diesen Verbindungen als auch den Acyl-Homoserinlactonen, auf denen die Quorum-Wahrnehmung vieler Biofilm-Bakterien basiert. Sie docken offenbar an die bakteriellen Rezeptoren der Botenstoffe an, ohne im Zell-Inneren ein Signal auszulösen. So werden keine der für die Biofilm-Bildung notwendigen Gene ausgeschaltet.

Indizien zufolge beugen die substituierten Furanone nicht bloß vor, sondern können auch zum Abbau bereits bestehender Biofilme beitragen. Überdies scheinen sie sogar für medizinische Anwendungen geeignet zu sein: Sie sind ungiftig und im Körper ausreichend beständig. Wichtiger noch: Obwohl Furanone seit Jahrmillionen in den Weltmeeren existieren, sind Bakterien nicht dagegen resistent geworden. Somit besteht



Auf einem industriellen Wärmetauscher ist ein üppiger Biofilm gewachsen. Ein solcher Befall kann die Effizienz senken.

RODNEY DONLAN UND DONALD L. GIBBON, CALGON CORPORATION / ASM MICROBELIBRARY (WWW.MICROLIBRARY.ORG)

J. W. Costerton, *promovierter Bakteriologe, leitet das Center for Biofilm Engineering an der Montana State University.* ***Philip S. Stewart***, *mit dem er seit fast zehn Jahren zusammenarbeitet, hat in chemischer Verfahrenstechnik promoviert und ist heute Stellvertretender Leiter und Forschungskoordinator des Zentrums.*

Das Ende des Schmetterlings-effekts

Angeblich folgt aus der Chaostheorie, dass Wettervorhersagen für Zeiträume von mehr als zwei Wochen unmöglich sind. Dieses Dogma ist mit Hilfe der statistischen Mechanik widerlegt worden.

Von Raoul Robert

Nur den Göttern des Olymps scheint die ewige Sonne. Den Menschen hingegen ist es seit jeher ein dringendes Bedürfnis zu wissen, welches Stück des Himmels ihnen demnächst auf den Kopf fallen wird. Innerhalb der letzten 2000 Jahre sind die verschiedensten Vorhersageverfahren angewendet worden, von Tieropfern und der Befragung von Orakeln bis hin zu umfangreichen Bauernregeln.

Erst in der Neuzeit gerieten diese jahrhundertelang praktizierten Methoden in Verruf. Die spektakulären Erfolge der Himmelsmechanik im 19. Jahrhundert nährten die Überzeugung, es müsse etwas Besseres geben als diese vorwissenschaftlichen Bemühungen, und die Wissenschaftler des 20. Jahrhunderts mühten sich nach Kräften, diesen Anspruch einzulösen. Aber atmosphärische Phänomene durch mathematische Gleichungen zu beschreiben und vor allem diese Gleichungen zu lösen, erwies sich als weitaus schwieriger als erwartet. Der allgemeine Optimismus, der noch in den fünfziger Jahren vorgeherrscht hatte, schlug daraufhin in sein krasses Gegenteil um, und die Begründung für den Pessimismus bekam auch noch einen hübschen Namen: Schmetterlingseffekt.

Der Flügelschlag eines Schmetterlings an einer Stelle der Erdoberfläche könne darüber entscheiden, ob zwei Wochen später an einer weit entfernten Stelle der Erde ein Tornado entsteht oder auch nicht. Da man offensichtlich nicht den Zustand aller Schmetterlinge der Welt in einem bestimmten Augenblick kennen kann, wäre es demnach unmöglich, den Zustand der Atmosphäre für mehr als zwei Wochen vorherzusagen.

Nun stellt sich heraus, dass dieser Pessimismus ebenfalls übertrieben ist. Ich weiß zwar auch nicht, wie man das Wetter in zwei Wochen vorhersagt; aber was immer uns daran hindert – die Schmetterlinge sind es nicht! Ein korrektes Forschungsergebnis ist unzulässig verallgemeinert worden. In diesem Artikel möchte ich darlegen, warum das – unbestritten vorhandene – Chaos nicht so überhand nimmt, wie die landläufige Vorstellung befürchten lässt.

In der langen Geschichte der physikalischen Vorhersage – seien es das Wetter oder auch die Bewegungen der Himmelskörper – gibt es ein entscheidendes Ereignis: Isaac Newton (1643–1727) entdeckte im 17. Jahrhundert die Bewegungsgleichungen der Planeten. Kennt man die Position und die Geschwindigkeit der Planeten zu einem bestimmten Zeitpunkt, so kann man ihre Bahnkurven für alle nachfolgenden Zeitpunkte aus-





DELPHINE BAILLY

Entgegen einem weit verbreiteten Mythos vermag der Flügelschlag eines Schmetterlings keinen Sturm auszulösen. In der Atmosphäre spielen statistische Phänomene eine Rolle: Turbulenzen ordnen sich, und die empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen lässt nach. Folglich darf man hoffen, dass Wettervorhersagen auch für mehr als zwei Wochen möglich sind.

rechnen. Da für alle mechanischen Systeme Gleichungen desselben Typs gelten, bestimmt der Anfangszustand eines Systems dessen Zukunft vollständig.

Pierre Simon Laplace (1749–1827) machte aus diesem mathematischen Resultat eine Ideologie: den Determinismus. Ihm zufolge kann es nichts Neues geben, weil alles, was geschehen kann, schon im Anfangszustand festgelegt ist. Das Problem der Vorhersage schien zumindest theoretisch gelöst.

Als in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Mathematiker dann tatsächlich versuchten, die Bahnen von Gestirnen für die fernere Zukunft zu berechnen, wurden Zweifel am Laplaceschen Determinismus laut. Henri Poincaré (1854–1912) und Jacques Hadamard (1865–1963) entdeckten, dass selbst einfachste Systeme wie zum Beispiel drei Massenpunkte, die nur der Gravitation unterworfen sind, auf sehr komplizierte Bahnkurven führen. Darüber hinaus fanden sie, dass bei vielen Systemen schon geringste Änderungen von Anfangsposition oder -geschwindigkeit zu erheblichen Änderungen in den Bahnkurven führen. Da man den Anfangszustand niemals exakt kennt, kann man die Entwicklung eines derartigen Systems nicht über einen gewissen Zeitpunkt hinaus vorhersagen.

Die Arbeiten von Poincaré und Hadamard sind die Grundlagen der Theorie, die ab den siebziger Jahren unter dem Namen „Chaostheorie" einen großen Aufschwung nahm (heute bevorzugen die Fachleute den Namen „Theorie der dynamischen Systeme"). Die soeben angesprochene empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsdaten wurde eingehend untersucht. So zeigten die Astronomen, dass es unmöglich ist, den Zustand des Sonnensystems jenseits von einigen hundert Millionen Jahren zu kennen. Dafür müsste man in den Rechnungen die Form der Himmelskörper, die Auswirkungen der Gezeiten und viele andere Parameter berücksichtigen. Damit war der Laplacesche Determinismus zwar nicht widerlegt, aber als nahezu gegenstandslos faktisch erledigt: Seine Voraussetzung, die hinreichend genaue Kenntnis der Anfangsdaten, ist nur in seltenen Ausnahmefällen erfüllt.

Der Schmetterling schlüpft

Kehren wir zum Wetter zurück: In den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts etablierte sich die „moderne" Meteorologie als groß angelegtes Gemeinschaftsprojekt von Atmosphärenphysik, Mathematik und Informatik. Anfang der sechziger Jahre führten die ersten leistungsfähigen Computer Berechnungen durch, die zuvor aussichtslos gewesen waren.

Zu dieser Zeit studierte der amerikanische Meteorologe Edward Lorenz ein vereinfachtes Modell der atmosphärischen Konvektion. Es war aus den klassischen Gleichungen für die innere Bewegung von Fluiden hergeleitet („Fluid" ist der Oberbegriff für Flüssigkeiten und Gase), enthielt aber nur noch drei Freiheitsgrade, das heißt, der Zustand seines Systems war zu jedem Zeitpunkt durch drei reelle Zahlen vollständig gekennzeichnet. Das „physikalische Gesetz" des Systems bestand aus drei (gewöhnlichen) Differenzialgleichungen für diese Variablen.

Lorenz bemerkte – durch Zufall –, dass es nicht möglich ist, die Entwicklung seines Modells langfristig vorherzusagen, da die kleinste Störung des Anfangszustandes auf die Dauer erhebliche Auswirkungen hat. Die dadurch entstehende Unsicherheit wächst exponentiell mit der Zeit: Wenn sie sich beispielsweise nach einer Stunde verdoppelt hat, ist sie nach einer weiteren Stunde viermal so groß, nach der dritten Stunde achtmal und so weiter. Als Lorenz den Zustand des Systems als Punkt im (dreidimensionalen) Raum darstellte, bemerkte er, dass der Punkt sich im Laufe der Zeit an ein komplexes Gebilde anschmiegt. Aufgrund dieser Eigenschaft nennt man es einen „Attraktor", und zwar einen „seltsamen" wegen seiner ungewöhnlichen topologischen Eigenschaften. Dieser spezielle Attraktor heißt heute „Lorenz-Attraktor" (Bild rechts).

Nach diesen Arbeiten am vereinfachten System wandte sich Lorenz den atmosphärischen Luftbewegungen im Großen zu. In erster Näherung fasste er die Atmosphäre als zweidimensionales ideales Fluid auf, das heißt, er vernachlässigte ihre Dicke und die Viskosität der Luft. Beide Vereinfachungen sind sinnvoll, denn verglichen mit ihrer horizontalen Ausdehnung ist die Atmosphäre eine sehr dünne Gasschicht, und die innere Reibung unter den Gasmolekülen ist in der Tat vernachlässigbar. Lorenz arbeitete, um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wieder mit wenigen Freiheitsgraden, diesmal einigen Dutzend, und fand abermals eine exponentiell empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen.

Ein realistisches Modell der Atmosphäre müsste sehr viele Freiheitsgrade enthalten: Die Werte für den Luftdruck, die Komponenten der Windgeschwindigkeit, die Luftfeuchtigkeit und andere sind theoretisch für jeden Punkt auf der Erde zu bestimmen, in der Praxis für ein hinreichend dichtes Netz von Punkten. Wenn es schon bei wenigen Freiheitsgraden so schwierig ist, die Zukunft vorherzusagen, dann, so glaubte Lorenz, könne die Situation bei den weitaus zahlreicheren Variablen eines realistischen Modells nur noch viel schlimmer sein.

Mit seinen Arbeiten hatte Lorenz Einsichten von Poincaré und Hadamard wiederentdeckt: Es ist nicht immer möglich, die Entwicklung eines einfachen Systems auszurechnen. Darüber hinaus hatte er gezeigt, dass dieses Problem nicht nur die Himmelsmechanik betrifft, sondern zum Beispiel auch Vorgänge in der Atmosphäre.

Wenn die Entwicklung der Atmosphäre so instabil sei, wie Lorenz behaupte, dann würde ja der Flügelschlag einer Möwe genügen, um ihre Entwicklung grundlegend zu verändern, wandte ein (namentlich nicht bekannter) Zuhörer in einem Vortrag von Lorenz ein. Dies sei in der Tat der Fall, erwiderte Lorenz und berechnete die sich nach einem Zeitraum von etwa zwei Wochen ergebenden

Glossar

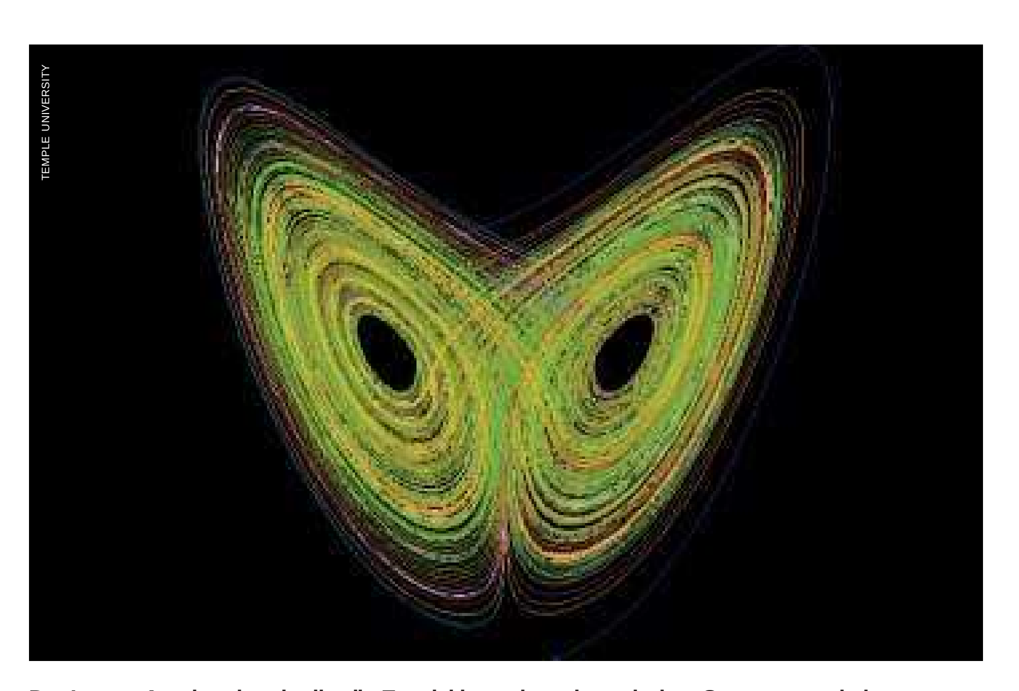
Dynamisches System: die mathematische Modellierung eines sich zeitlich verändernden Systems samt einer Vorschrift, die aus dem Zustand des Systems zu einem Zeitpunkt den Zustand für künftige Zeitpunkte eindeutig bestimmt.

Phasenraum: die Menge aller Zustände, die das System einnehmen könnte. Dem Zustand des Systems entspricht also ein Punkt, der mit der Zeit in dem (geometrisch interpretierten) Phasenraum wandert.

Attraktor: eine Teilmenge des Phasenraums, welcher der Systemzustand im Laufe der Zeit immer näher kommt. Das einfachste Beispiel eines Attraktors ist ein stabiler Gleichgewichtszustand: Er besteht nur aus einem Punkt.

Änderungen. Im Laufe dieser Auseinandersetzung wurde aus der Möwe ein Schmetterling, und der „Schmetterlingseffekt“ war geboren.

Ungefähr zur gleichen Zeit schuf Vladimir Arnold, ein Mathematiker am Steklov-Institut in Moskau, einen völlig anderen Zugang zum selben Problem. Aufbauend auf den Ideen seines Lehrers Andrej Kolmogorow (1903–1987) betrachtete er die Bewegung eines Punktes auf einer gekrümmten Fläche. Der Punkt ist keinen Kräften ausgesetzt, abgesehen davon, dass er gezwungen ist, auf der Fläche zu bleiben, und im Übrigen nur von seiner Trägheit getrieben. Unter diesen Umständen folgt er einer speziellen Kurve auf der Fläche; sie heißt „Geodätische“, weil sie zwischen je zwei ihrer – nicht allzu weit entfernten – Punkte die kürzeste Verbindung auf der Fläche ist. Lässt man zwei Punkte mit geringfügig verschiedenen Anfangspositionen und -geschwindigkeiten loslaufen, so werden ihre Bahnen zumindest eine Weile nahe beieinander bleiben.



Der Lorenz-Attraktor beschreibt die Entwicklung eines dynamischen Systems aus drei reellen Variablen, das empfindlich von seinen Anfangsbedingungen abhängt. Zwei Punkte (Systemzustände), die anfänglich nahe beieinander liegen, trennen sich bald und verhalten sich auf lange Sicht sehr unterschiedlich. Ein kleiner Messfehler bezüglich des Anfangszustandes erzeugt also eine beträchtliche Unsicherheit über spätere Zustände.

Punkte wandern auf krummen Flächen

Ein deutlich anderes Bild ergibt sich, wenn die Fläche in jedem ihrer Punkte negativ gekrümmt ist. Solche Flächen sehen in jedem Punkt so aus wie der Sattel eines Pferdes: Steht man auf der Fläche und schaut in eine Richtung, so ist die Fläche von einem weg gekrümmt; schaut man in die dazu senkrechte Richtung, so ist sie auf einen zu gekrümmt. Hadamard hatte gezeigt, dass die Bewegung eines Punktes auf einer solchen Fläche exponentiell instabil ist: Verändert man den Anfangspunkt oder die Anfangsgeschwindigkeit nur ein wenig, so gerät die neue Bahnkurve auf die Dauer weit weg von der alten.

Ein einzelner Sattelpunkt einer Fläche ist so etwas wie ein Scheideweg: Je nachdem, ob der bewegte Punkt haarscharf links oder rechts neben den Sattelpunkt gerät, läuft er in das eine oder das andere „Tal“ weiter. Eine negativ gekrümmte Fläche besteht sozusagen nur aus Scheidewegen; also werden sich auch die Wege ursprünglich eng benachbarter Punkte irgendwann trennen. In der Praxis ist es nicht möglich, ihre Bahnkurven für einen längeren Zeitraum auszurechnen.

Arnold gelang es nun, die Bewegung eines idealen Fluids durch diejenige eines Punktes auf einer „Fläche“ zu beschreiben. Damit führte er das Problem der hydrodynamischen Instabilität auf eine Berechnung von Krümmungen zurück. Die „Fläche“ ist dabei sehr eigenartig. Sie hat nämlich unendlich viele Dimensionen; gleichwohl kann man wie bei einer gewöhnlichen Fläche ihre Krümmung und die geodätische Bahn eines Punktes definieren. Der ganze Zustand der Atmosphäre, genauer: die Windgeschwindigkeit in jedem Punkt (das so genannte Geschwindigkeitsfeld) entspricht also einem einzigen Punkt auf dieser „Fläche“, der sich mit der Zeit bewegt. Arnold gelang es sogar, deren Krümmung zu berechnen und zu zeigen, dass die Bewegungen eines idealen Fluids geodätischen Bahnen analog sind.

Offensichtlich ist die Realität der Luftbewegung viel komplizierter. Immerhin konnte man Arnolds Rechnungen entnehmen, dass nicht nur die Bahn des ganzen Systems, sondern auch die jedes Fluidteilchens exponentiell instabil ist: Zwei ursprünglich eng benachbarte Luftmoleküle werden sich in aller Regel im Laufe der Zeit so schnell voneinander entfernen, dass ihre Abstände sich in konstanten Zeitintervallen verdoppeln.

Am Ende der sechziger Jahre waren also zu den alten Erkenntnissen Poincarés und Hadamards über die empfindliche Abhängigkeit dynamischer Systeme von den Anfangsdaten zwei neue hinzugekommen: zum einen die empirischen Funde von Lorenz über ein Atmosphärenmodell mit zunächst drei, dann einigen Dutzend Freiheitsgraden, zum anderen die Untersuchungen von Arnold über ein System mit unendlich vielen Freiheitsgraden. Beide Systeme zeigten exponentielle Instabilität. Im Verein mit den praktischen Schwierigkeiten der Wettervorhersage fügten sich diese Ergebnisse zu einem schlüssigen Bild: Die Bewegungen der Atmosphäre seien wegen ihrer exponentiell empfindlichen Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen prinzipiell nicht vorhersagbar. Damit war der Schmetterlingseffekt von einer seltsamen Eigenschaft eines speziellen Systems zu einem allgemein gültigen Prinzip aufgestiegen.

Der Schmetterling schlägt mit den Flügeln

Das eingängige und leicht verständliche Bild vom Schmetterling fand weite Verbreitung und verdrängte als neues Paradigma gar den Laplaceschen Determinismus. Andere Disziplinen wie Ökonomie und Soziologie griffen es begierig auf, und mehr oder weniger berufene Philosophen huben an, die Welt in „modernen“ Begriffen wie Chaos, Komplexität und Nicht-Vorhersagbarkeit neu zu denken. Nur hält der Schmetterlingseffekt bei genauerem Hinsehen einer detaillierteren Analyse nicht Stand.

In den letzten Jahrzehnten untersuchten die Meteorologen, wie sich ein Anfangsfehler in den Modellen fortsetzt, die zur Wettervorhersage verwendet werden. Dabei stellten sie fest, dass nach ei- ▶

ner kurzen Zeitspanne von etwa ein bis zwei Tagen die Störungen nicht mehr exponentiell anwachsen, wie den Ergebnissen von Lorenz entsprochen hätte, sondern nur linear, das heißt proportional zur verflossenen Zeit. Wie ist dieser Widerspruch zum Schmetterlingseffekt zu erklären?

Für Lorenz und die vielen, die seiner Argumentation folgten, war die Übertragung seiner Ergebnisse von wenigen auf viele Freiheitsgrade sehr nahe liegend. Sie übersahen allerdings, dass genau dabei neue Phänomene statistischer Natur ins Spiel kommen. Sie bilden die Grundlage der statistischen Mechanik, die Ludwig Boltzmann (1844–1906) gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte.

Betrachten wir ein bekanntes Beispiel: vier oder fünf Gasmoleküle in einem abgeschlossenen Volumen. Diese stehen miteinander und mit den Wänden ihres Behälters in Wechselwirkung. Will man das Verhalten dieses kleinen Systems auf lange Sicht berechnen, stößt man auf dieselben Schwierigkeiten wie Lorenz: Man kann nicht vorhersagen, welche Bahnen die Moleküle durchlaufen werden.

Betrachten wir nun andererseits das System aus den ungefähr 10^{26} Gasmolekülen, die bei normalem Luftdruck in einem Behälter von einem Liter Volumen enthalten sind. Die Bewegung jedes einzelnen Moleküls präzise zu berechnen ist nicht nur praktisch, sondern auch im Prinzip ausgeschlossen: Was bei fünf Molekülen schon nicht gelingen kann, ist bei einer solch astronomischen Anzahl erst recht unmöglich. Dagegen sind statistische Mittelwerte wie Dichte, Druck und Temperatur sehr wohl langfristig berechenbar. So kann man beispielsweise mit sehr großer Genauigkeit vorhersagen, dass die Dichte im gesamten Gasvolumen räumlich und zeitlich konstant bleiben wird.

Die ordnende Wirkung der großen Zahlen

Wie schon Boltzmann bemerkte, liegt der Grund für diese Vorhersagbarkeit ausgerechnet am Chaos im Kleinen: Eben weil die Moleküle keinem einheitlichen Einfluss unterworfen sind, sondern ungeheuer vielen Stößen untereinander und mit den Behälterwänden, neigen sie dazu, den gesamten verfügbaren Raum auszufüllen. Auch wenn man sie anfänglich alle in einer Ecke zusammendrängt, verbleiben sie dort nicht, wegen ihrer ungeordneten Bewegungen.

Statistische Mittelwerte wie den Druck nennt man „makroskopische Observable", während die Bahnen der einzelnen Moleküle „mikroskopische Observable" heißen. Boltzmanns Resultat lässt sich somit wie folgt ausdrücken: Im Falle vieler Freiheitsgrade können die makroskopischen Observablen vorhersagbar sein, obwohl es die mikroskopischen nicht sind.

Bevor wir weitergehen, machen wir einen Ausflug ins Gebiet der Turbulenzen, weil die Atmosphäre ein turbulentes Fluid ist.

Nur wenn die innere Reibung unter den Molekülen eines Fluids dominiert, ist dessen Strömung geordnet („laminar"). Die Strömungen, die man in der Praxis im menschlichen Maßstab beobachtet (Flüsse, Luftbewegungen und anderes), sind im Allgemeinen turbulent, das heißt komplex und ungeordnet, ebenso wie die Strömungen in der Atmosphäre oder in den Ozeanen.

Wir interessieren uns besonders für zweidimensionale turbulente Strömungen, also für solche, die in der Ebene oder auf einer Fläche stattfinden. Das ist, wie oben dargestellt, für die Lufthülle der Erde oder auch für die Ozeane eine sinnvolle Näherung, weil die Dicke dieser Fluide im Vergleich zu ihrer horizontalen Ausdehnung vernachlässigbar ist.

Weiter gehen wir davon aus, dass die Luft in der Atmosphäre sich so verhält, als wäre sie inkompressibel (als würde ihr Volumen durch Druckerhöhung nicht abnehmen); dies trifft zumindest im großen Maßstab zu. Unter diesen Voraussetzungen ist die Strömung bereits eindeutig bestimmt durch eine für jeden Punkt definierte Größe, die so genannte „Wir- ▶

Die Entstehung großräumig geordneter Strukturen


Benachbarte Kreisel (sie stellen die Wirbeldichte dar) haben in etwa gleiche Geschwindigkeiten.


Benachbarte Kreisel können unterschiedliche Geschwindigkeiten haben.


Die Kreisel zeigen lokal eine chaotische Bewegung.

POUR LA SCIENCE

Die Bewegung eines idealen inkompressiblen zweidimensionalen Fluids, beispielsweise der Atmosphäre, wird durch die so genannte Wirbeldichte eindeutig beschrieben: Jedem Punkt wird ein sehr kleiner „Kreisel" zugeordnet, der durch die Strömung fortgetragen wird, wobei er seine Rotationsgeschwindigkeit beibehält.

Im instabilen Anfangszustand (links) ist die Wirbeldichte eine stetige Funktion des Ortes: Benachbarte Kreisel rotieren mit nahezu derselben Geschwindigkeit. Treffen zwei gegenläufige Strömungen aufeinander, so entstehen Turbulenzen (Mitte); gelegentlich haben zwei benachbarte Punkte sehr unterschiedliche Wirbeldichten. Im Kleinen lässt sich die Wirbeldichte aller Punkte nicht vorhersagen. Dennoch bildet die Flüssigkeit im Großen kohärente Strukturen heraus (rechts ein einfacher Wirbel). Es herrscht also Ordnung, obwohl im Kleinen das Chaos weiter besteht.



Große Wirbel umrunden den Südpol. Kleinräumige atmosphärische Turbulenzen ordnen sich zu diesen „kohärenten Strukturen".

beldichte" (*vorticity*). Diese gibt an, wie schnell das Fluid in der Umgebung des jeweiligen Punktes rotiert (die Wirbeldichte ist die Rotation des Geschwindigkeitsvektors): An jedem Punkt sitzt gewissermaßen ein kleiner Kreisel. Das Fluid besteht aus sehr vielen Kreiseln, die sich nicht unbedingt alle in dieselbe Richtung drehen. In der Bewegung des Fluids schwimmen die Kreisel mit. In unserem Fall bleibt die Wirbeldichte der Fluidteilchen unverändert: Die Kreisel bewegen sich zwar mit der Strömung, behalten aber ihre Rotation bei, weil sie mangels innerer Reibung keine Wechselwirkung miteinander haben.

Während also zweidimensionale inkompressible Strömungen im Kleinen chaotisch verlaufen, beobachtet man im Großen, dass sich die Turbulenzen ordnen und so genannte „kohärente Strukturen" entstehen. Diese großen Strukturen bestehen aus einem Wirbel, einem Paar gegenläufiger, gekoppelter Wirbel, gelegentlich auch aus drei oder mehr Wirbeln. Sie erstrecken sich in der Erdatmosphäre über mehrere tausend Kilometer; an den Wolken, die der Luftbewegung folgen, kann man sie Tag für Tag auf Satellitenfotos erkennen (Bild oben). Ein spektakuläres Beispiel für eine kohärente Struktur ist der rote Fleck auf dem Jupiter, ein gigantischer Wirbel in einer dünnen Gasschicht an der Oberfläche des Planeten (Bild Seite 74).

Es ist charakteristisch für zweidimensionale Strömungen, dass sie systematisch solche kohärenten Strukturen ausbilden. Nach ihrem Auftreten bleiben diese dem allgemeinen Chaos zum Trotz erhalten, was den Beobachtern lange Zeit Rätsel aufgegeben hat. Warum werden sie durch die starken Turbulenzen, in die sie eingebettet sind, nicht zerstört?

Ein Wirbel, beispielsweise in einem Fluss, ist lokal durch eine erhöhte Wirbeldichte gekennzeichnet, das heißt, dass viele gleichsinnige Kreisel in der Umgebung eines Punktes konzentriert sind. Warum aus solchen elementaren Wirbeln kohärente Wirbelsysteme entstehen sollten, ist zunächst nicht einleuchtend, im Gegenteil: Die Wirbel interagieren in komplexer Weise miteinander, wobei sie gelegentlich in mehrere kleinere Teile zerfallen. Gleichwohl organisiert sich die Strömung schließlich in einigen einfachen, zeitlich stabilen Strukturen. Ein Beispiel ist das Azorenhoch, das sich verformt und umherwandert, aber im Großen und Ganzen in derselben Region verbleibt. Im Laufe der letzten zwanzig Jahre ist es gelungen, das Auftreten stabiler Wirbel in turbulenten Strömungen numerisch zu simulieren.

Mikro- und makroskopische Variablen

Die theoretische Begründung für dieses Verhalten ist in der statistischen Mechanik zu finden. Der norwegisch-amerikanische Physiker Lars Onsager (1903–1976) hatte 1949 bemerkt, dass die kinetische Energie einer Flüssigkeit in einer zweidimensionalen turbulenten Strömung erhalten bleibt. Im Zusammenhang damit schlug er vor, die stabilen Wirbel als Gleichgewichtszustände im Sinne der statistischen Mechanik Boltzmanns zu beschreiben.

Dieses Vorhaben litt lange unter großen theoretischen Schwierigkeiten, die sich erst auflösten, als man zwei Größenskalen einführte: Die „makroskopische" Skala betrifft die Bewegung im großen Maßstab (typische Länge im Falle der Erdatmosphäre: einige tausend Kilometer) unter Vernachlässigung von Einzelheiten. Auf dem „mikroskopischen" Niveau beschreibt man, was im Kleinen geschieht, also in der Größenordnung (einige Kilometer), in der sich das Chaos der Turbulenzen entfaltet. Nach dem Vorbild Boltzmanns definiert man eine Entropie, also eine Größe, welche die Unordnung (hier verursacht durch die Turbulenz) quantifiziert. Und zwar erhält man die Entropie eines makroskopischen Zustands, indem man die ihm entsprechenden mikroskopischen Zustände abzählt. Je größer diese Anzahl, desto größer ist die Entropie. In der Realität beobachtet man stets den Makrozustand mit der größten Wahrscheinlichkeit; das ist derjenige, der die meisten Mikrozustände auf sich vereinigt, also derjenige, der die Entropie maximal macht. In der Atmosphäre entsprechen diese Zustände gerade den kohärenten Wirbelstrukturen.

Beschreiben wir genauer, wie kohärente Strukturen entstehen (Kasten Seite 70). Im Anfangszustand variiert die Wirbeldichte stetig von einem Punkt im Fluid zum nächsten: Benachbarte Kreisel drehen sich ungefähr mit derselben Geschwindigkeit. Die turbulente Strömung verursacht eine komplexe Bewegung auf der kleinen Größenskala. Dadurch vermischen sich Kreisel unterschiedlicher Geschwindigkeiten miteinander, und die Wirbeldichte variiert in chaotischer Weise: In unmittelbarer Nachbarschaft eines langsamen Kreisels findet sich ein sehr schneller. Es ist unmöglich, die Wirbeldichte für einzelne Punkte der Flüssigkeit vorherzusagen. Dennoch führen die inkohärenten Änderungen der Wirbeldichte im Kleinen zur Herausbildung von Strukturen im Großen.

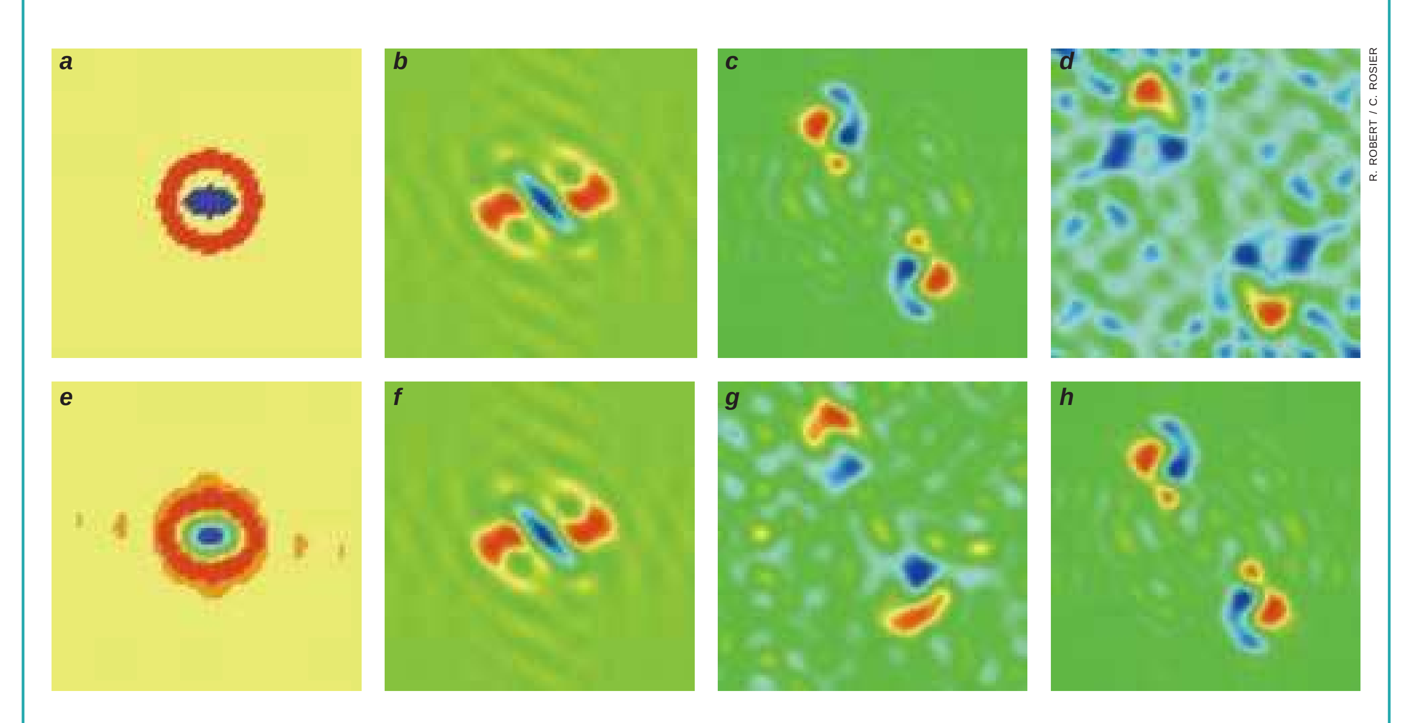
Der Übergang von der mikroskopischen Variablen Wirbeldichte zum makroskopischen Geschwindigkeitsfeld der Atmosphäre ist analog dem Übergang von der Bewegung der Gasmoleküle zur makroskopischen Variablen Druck: Durch die chaotische Bewegung füllen die Moleküle den Behälter gleichmäßig aus und stoßen gelegentlich gegen die Wände. Der Druck errechnet sich durch Mittelung aus all diesen Stößen, und sein Wert ist für jeden Punkt der Wände derselbe. Ebenso ist das Geschwindigkeitsfeld einer Strömung ein statistisches Mittel der Wirbeldichten. Es ist allerdings im Gegensatz zum Druck nicht räumlich konstant, sondern zeigt strukturierte Wirbel.

Aus der statistischen Mechanik folgt auch, dass das Geschwindigkeitsfeld als makroskopische Variable vorhersagbar ist – zumindest theoretisch. Widerspricht dies den Erkenntnissen von Arnold? Nein, denn seine Berechnungen zeigen nur, dass die mikroskopischen Bahnkurven der Fluidteilchen in der Zeit von exponentieller Instabilität sind. Ursprünglich benachbarte Kreisel laufen weit auseinander, wodurch schnelle und langsame Kreisel vermischt werden. Dieses Phänomen verursacht chaotische Veränderungen der Wirbeldichte im Kleinen, die aber letztendlich auf dem makroskopischen Niveau ein vorhersagbares Geschwindigkeitsfeld erzeugen.

Es ist uns gelungen, diese theoretischen Überlegungen zu bestätigen, und zwar durch numerische Simulationen für die Bewegung eines idealen zweidimensionalen Fluids mit einer großen Zahl ▶

Der Schmetterlingseffekt – nachgerechnet

Chaos im Kleinen ergibt Ordnung im Großen

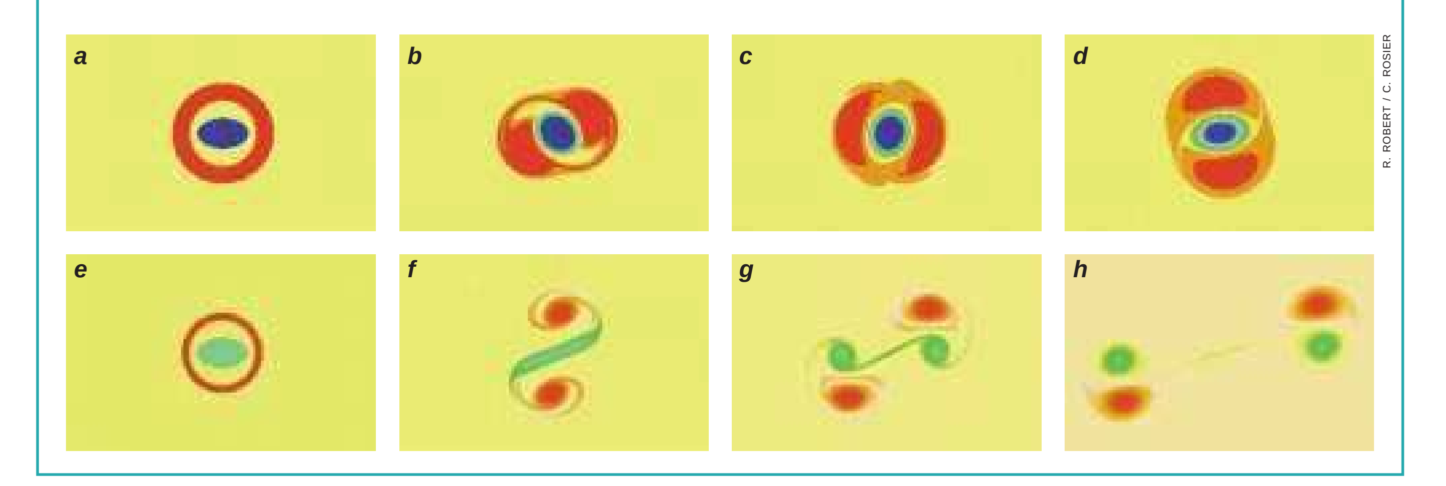


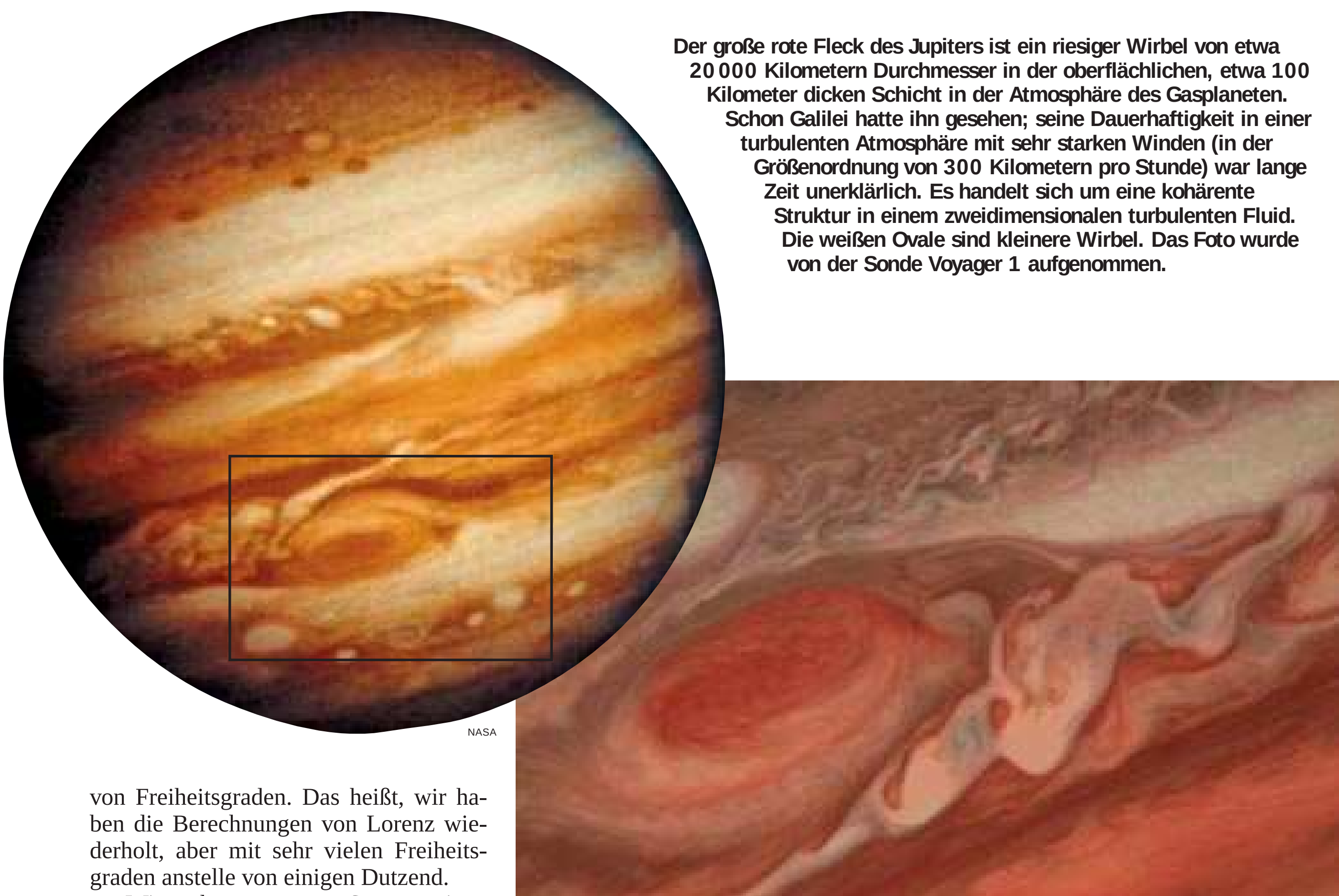
Die hier abgebildeten Computersimulationen hat Carole Rosier an der Universität Lyon 1 durchgeführt. Sie entsprechen dem im Text näher beschriebenen zweidimensionalen Modell der Atmosphäre.

Jedem Punkt des ebenen Gebiets wird eine Wirbeldichte (ein „Kreisel") zugeordnet. Deren Werte sind durch Farben wiedergegeben: von blau (negative Wirbeldichte, Kreisel dreht sich im Uhrzeigersinn) über gelb (Wirbeldichte null) bis rot (positive Wirbeldichte, Kreisel dreht sich gegen den Uhrzeigersinn). Der Anfangszustand (*a*) besteht aus einer ellipsenförmigen Region negativer Wirbeldichte umgeben von einem Ring, in dem die Wirbeldichte positiv ist.

Wenn die gesamte Atmosphäre nur durch wenige Punkte (einige hundert) repräsentiert ist, vertritt jeder von ihnen eine entsprechend große Fläche, und das Gesamtbild ist ziemlich grobkörnig (oben). Nach einer kurzen Zeit treten drei Wirbel auf (*b*), die anschließend zerfallen (*c*); die Atmosphäre wird zunehmend chaotisch (*d*). Dieselbe Entwicklung mit geringfügig gestörtem Anfangszustand verläuft zunächst (*f* und *g*) sehr ähnlich, dann allerdings völlig anders (*h*). Diese empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsdaten vereitelt jede langfristige Vorhersagbarkeit. Dies entspricht den Beobachtungen von Edward Lorenz.

Bei einer großen Anzahl von Punkten (etwa 100 000) ergibt sich ein grundsätzlich anderes Bild (unten). Zunächst deformiert sich der Ring und windet sich in komplexer Weise um die Ellipse (*b*). Nach und nach entsteht ein System aus einem zentralen Wirbel, an den zwei weitere Wirbel mit entgegengesetztem Drehsinn angekoppelt sind (*c*). Das Ganze stabilisiert sich und führt eine gleichmäßige Drehbewegung aus (*d*). Bei einem Anfangszustand mit dünnerem Ring (*e*) streckt sich der zentrale Wirbel (*f*), und das System teilt sich in zwei Dipole, die mit konstanter Geschwindigkeit auseinander streben (*g*, *h*). In beiden Fällen hat eine leichte Störung des Anfangszustandes (hier nicht dargestellt) nur minimale Auswirkungen. Es gibt keine empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsdaten, und man kann das Verhalten des Systems vorhersagen.





Der große rote Fleck des Jupiters ist ein riesiger Wirbel von etwa 20 000 Kilometern Durchmesser in der oberflächlichen, etwa 100 Kilometer dicken Schicht in der Atmosphäre des Gasplaneten. Schon Galilei hatte ihn gesehen; seine Dauerhaftigkeit in einer turbulenten Atmosphäre mit sehr starken Winden (in der Größenordnung von 300 Kilometern pro Stunde) war lange Zeit unerklärlich. Es handelt sich um eine kohärente Struktur in einem zweidimensionalen turbulenten Fluid. Die weißen Ovale sind kleinere Wirbel. Das Foto wurde von der Sonde Voyager 1 aufgenommen.

von Freiheitsgraden. Das heißt, wir haben die Berechnungen von Lorenz wiederholt, aber mit sehr vielen Freiheitsgraden anstelle von einigen Dutzend.

Wir gaben unserem System einen speziellen Anfangszustand (Wert der Wirbeldichte in jedem Punkt) vor; dann ließen wir das System sich entwickeln. Nach einer relativ kurzen Übergangsphase kam eine geordnete Struktur zum Vorschein, und zwar je nach Anfangszustand eine kohärente Struktur aus drei gekoppelten Wirbeln, die als Ganzes gleichförmig rotieren, oder zwei Paare gegenläufiger Wirbel, die sich mit konstanter Geschwindigkeit voneinander entfernen (Kasten Seite 73 unten). Derartige Strukturen findet man auch in der Atmosphäre und in den Ozeanen.

Wo bleibt der Schmetterlingseffekt?

Ändern wir in den vorangehenden Simulationen die Anfangsbedingungen geringfügig. Im ersten Fall hat die Störung keinerlei Auswirkung auf die Herausbildung der Struktur: Man erhält dieselben drei gekoppelten Wirbel. Die Energie der Störung nähert sich rasch einem konstanten Wert, der klein ist im Verhältnis zur Gesamtenergie des Systems. Auch im zweiten Fall führt eine Störung zu keiner merklichen Änderung: Man findet die beiden Paare von Wirbeln wieder. Allerdings wächst die Energie der Störung linear mit der Zeit.

Wenn man aber den Anfangszustand auf die Grenze zwischen den beiden vorangehenden Fällen legt, weiß das System gewissermaßen nicht, was es tun soll. In diesem kritischen Fall – und nur in diesem – verhalten das gestörte und das ungestörte System sich unterschiedlich. Die Energie der Störung entwickelt sich zu Beginn wie bei den beiden anderen Fällen, geht dann aber schlagartig zu exponentiellem Wachstum über. Die berüchtigte exponentielle Instabilität tritt also nur in dieser außergewöhnlichen Situation auf, in der das System am Scheideweg zwischen zwei Entwicklungen steht: einem „Phasenübergang“.

Wiederholen wir dieselben Rechnungen mit einer verringerten Anzahl an Freiheitsgraden, so bildet sich keine kohärente Struktur mehr heraus. Vielmehr zeigt sich ein turbulentes Chaos, das schließlich den ganzen Raum einnimmt (Kasten Seite 73 oben). Die Energie der Störung nimmt schnell zu und wird vergleichbar der Gesamtenergie des Systems; damit bestätigen sich die Beobachtungen von Lorenz.

Diese numerischen Simulationen zeigen, dass sich das System sehr unterschiedlich entwickelt je nachdem, ob man wenige oder viele Freiheitsgrade berücksichtigt. In dem letzteren – realitätsnäheren – Fall lässt sich das Geschwindigkeitsfeld des Fluids vorhersagen, obwohl auf Grund der Turbulenzen im Kleinen die Bahnkurven der einzelnen Fluidteilchen chaotisch und unvorhersagbar sind. Insbesondere ist das Verhalten des Systems, von Ausnahmesituationen abgesehen, nicht exponentiell empfindlich gegen kleine Änderungen der Anfangsbedingungen.

Literaturhinweise

Long range predictability of atmospheric flows. Von Raoul Robert und Carole Rosier in: Nonlinear Processes in Geophysics, Bd. 8, S. 55, 2001.

Prévision déterministe et statistique de l'environnement et de la turbulence. Von J. Hunt in: Turbulence et déterminisme, hrsg. von M. Lesieur. Presses universitaires de Grenoble, 1998.

Topological methods in hydrodynamics. Von V. I. Arnold und B. A. Khesin. Springer, 1996.

Statistical equilibrium states for two-dimensional flows. Von R. Robert und J. Sommeria in: Journal of Fluid Mechanics, Bd. 229, S. 291, 1991.

Nun sind auch unsere Simulationen der Realität noch nicht besonders nahe: Die Erdatmosphäre ist wesentlich komplexer als das ideale zweidimensionale Fluid, das wir hier betrachtet haben. Gegen diesen Einwand ist zweierlei zu erwidern: Erstens ist das System, an dem Lorenz zu seiner der unsrigen entgegengesetzten Schlussfolgerung gelangte, im Prinzip dasselbe wie unseres, nur noch vereinfachter und deswegen der Realität noch ferner. Zweitens haben die komplexeren Systeme, welche die atmosphärischen Strömungen realistischer nachbilden, dieselben Eigenschaften wie unseres: Chaos im Kleinen, Nichtvorhersagbarkeit der Bahnkurven einzelner Fluidteilchen und Ausbildung kohärenter Strukturen.

Unsere Untersuchungen über die empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen beziehen sich auf einen speziellen Mechanismus der Selbstorganisation, der – obwohl ausgewählt wegen seiner Instabilität – nicht alle möglichen zweidimensionalen Strömungen umfasst. Dennoch ist er repräsentativ für die Phänomene, die man in der Atmosphäre beobachtet, insbesondere die Herausbildung kohärenter Strukturen, die sich um unseren Planeten herum bewegen und miteinander wechselwirken, wie die Hoch- und Tiefdruckgebiete. Andere Autoren haben in ihren Simulationen dasselbe Phänomen gefunden wie wir: Die Energie der Störung wächst meist linear, nur sehr selten exponentiell – in Übereinstimmung mit den Beobachtungen der Meteorologen.

Und nun die Wettervorhersage für die nächsten zwei Wochen

Damit ist die Möglichkeit von Vorhersagen neu und optimistischer zu bewerten: Die Unsicherheit einer Vorhersage verdoppelt sich nicht in konstanten Zeitabständen, wie Lorenz behauptete, sondern wächst linear (sie verdoppelt sich, wenn sich die Zeit verdoppelt). Somit sind auch die von Lorenz genannten zwei Wochen keine unüberwindliche Grenze der Vorhersagemöglichkeiten. Eine bessere Kenntnis des Anfangszustands durch ein dichteres Netz von Beobachtungsstationen, leistungsfähigere Computer sowie bessere physikalische Modelle und numerische Verfahren können diese Grenze hinausschieben.

Allerdings ist dieser Optimismus zu dämpfen: Wie wir gesehen haben, bleibt die Vorhersage unsicher in den kritischen Situationen, in denen das System zwischen zwei Möglichkeiten schwankt. Lokale Vorhersagen wie beispielsweise solche von Gewittern sind noch viel schwieriger, weil sie die Details der Erdoberfläche berücksichtigen müssen.

Der Schmetterlingseffekt wird bei allen möglichen Gelegenheiten zitiert, selbst in der Ökonomie und in der Soziologie, um zu betonen, dass die Wirkungen kleiner Störungen und damit das Verhalten des ganzen Systems prinzipiell unvorhersagbar seien. Das mag im Einzelfall sogar zutreffen; nur gilt stets der statistische Einwand: Soweit es um makroskopische Größen geht, das heißt um Mittelwerte aus sehr vielen Einzelkomponenten, ist deren chaotisches Verhalten kein Hindernis für die Vorhersagbarkeit. Die Moleküle in einem Kochtopf, einer Dampfmaschine oder einem Luftballon verhalten sich jedes für sich sehr chaotisch; aber wenn der Ballon platzt – oder sonst etwas Unerwartetes geschieht –, liegt es nicht am Chaos. ■

Raoul Robert *ist Forschungsdirektor der französischen Forschungsgemeinschaft CNRS und arbeitet am Institut Fourier der Universität Grenoble.*



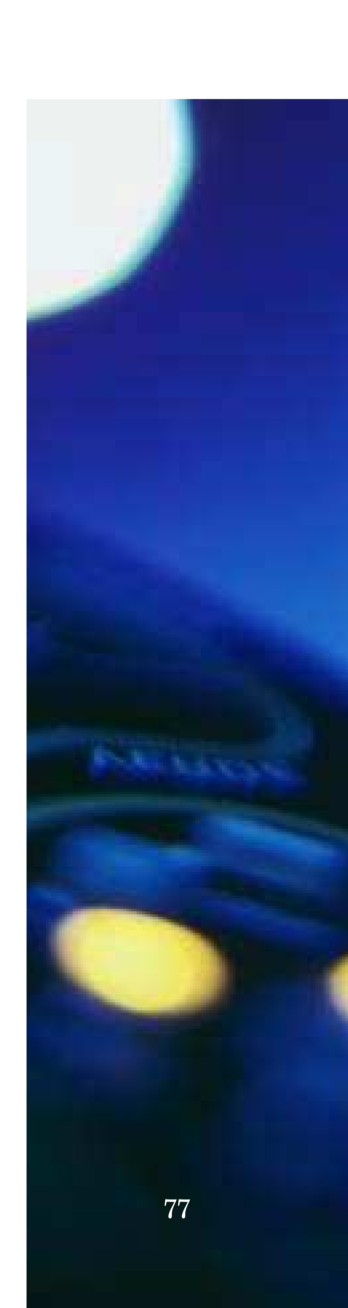
WULF BRACKROCK

Moderne Lichttechnik

Die gute alte Glühbirne hat sich zur HighTech-Halogenlampe gemausert. Doch Leuchtdioden bedrängen ihren Markt.

Jahrtausendelang diktierte der Rhythmus von Tag und Nacht den Alltag der Menschen. Künstliches Licht aus Glühbirnen und Neonröhren hat diese Beschränkung zumindest teilweise aufgehoben: Bei Arbeit und Freizeit machen Menschen längst die Nacht zum Tage. Psychologen untersuchen die Wirkung von Kunstlicht etwa auf das Wohlbefinden.

Im Fokus der Ingenieure steht denn auch nicht mehr die reine Grundversorgung mit Licht, sondern dessen Qualität und „Produktion“. Neuartige Leuchtstoffröhren drängen bereits auf den Markt, weiß strahlende Leuchtdioden werden ihnen schon bald Konkurrenz machen. Das Ziel: Kunstlicht soll dem Tageslicht immer mehr ähneln – zu geringen Kosten und ohne Folgen für die Umwelt. ▸



LEUCHTDIODEN

Bye, bye, Glühbirne

In ein bis zwei Jahrzehnten, so glauben die Autoren, werden Leuchtdioden herkömmliche, auf Glühbirnen aufbauende Lichtmittel weitgehend verdrängt haben.

Von M. George Craford, Nick Holonyak jr. und Frederick A. Kish jr.

Vor sechs Jahren erhielt einer von uns (Nick Holonyak) in Japan einen Forschungspreis. Nach der Technologie von morgen befragt, deutete er nur auf die Deckenlampen und antwortete sinngemäß, deren Zeit sei bald vorbei. Denn im wahrsten Sinne des Wortes findet vor unseren Augen eine Revolution statt, die wir kaum bemerken. Licht emittierende Halbleiter-Bauteile, so genannte LEDs (*light emitting diodes*) verdrängen bereits herkömmliche Glühbirnen in Nischenmärkten, weil sie elektrischen Strom viel effizienter in farbiges Licht verwandeln. Noch sind sie vor allem auf rote oder grüne Anzeigelämpchen in elektronischen Geräten beschränkt, doch weltweit arbeiten Wissenschaftler an kostengünstigen weiß strahlenden LEDs – ein potenzieller Milliardenmarkt.

Bei rotem Licht ist der Wirkungsgrad dieser Halbleiter-Elemente zehnmal größer als der ihrer konventionellen Konkurrenz. Sie sind außerdem robust und klein; manche Typen leuchten 100 000 Stunden, also mehr als ein ganzes Jahrzehnt lang. Eine Glühbirne dagegen brennt meist schon nach tausend Stunden durch. Intensität und Farben erlauben auch große Bildschirme mit LEDs zu bauen – das beeindruckendste Beispiel dafür bietet wohl die acht Stockwerke hohe Reklamefläche an der Technologiebörse Nasdaq in New York.

In Europa werden Leuchtdioden für sechzig bis siebzig Prozent der hochgesetzten Bremsleuchten von Automobilen verwendet. Weitere aktuelle Anwendungen sind Blink- und Schlusslichter sowie seitliche Begrenzungsleuchten bei Bussen und Lastkraftwagen. Es ist zu erwarten, dass bis zum Ende des Jahrzehnts in roten und gelben Außenleuchten von Fahrzeugen ausschließlich LEDs Licht spenden werden.

Größere und hellere Ausführungen erobern derzeit den Markt der roten Ampellichter; in den USA sind es schon etwa zehn Prozent. Herkömmlich erzeugen Filter den passenden Farbton. Zwar



Über dem Duisburger Innenhafen verleihen Ketten aus je 15 weißen Leuchtdioden um jede zehnte Stahlstrebe der neuen Zugbrücke eine geheimnisvolle Atmosphäre.

FOTOS: ANSORG

kostet das Licht von Glühbirnen nicht einmal Pfennigbeträge pro Lumen (die Standard-Maßeinheit für die Lichtstärke), doch ein roter Filter absorbiert um die achtzig Prozent ihres Lichts, die dafür aufgewendete elektrische Energie wird schlicht in Wärme umgewandelt. LEDs in Ampeln erzeugen ein Lumen für etwa dreißig Pfennig, aber gleich in der richtigen Farbe. Insgesamt verbraucht die rote LED-Ampel nur 10 bis 25 Watt, gleiche Helligkeit mit Glühbirne und Rotfilter erfordert 50 bis 150 Watt. In den USA amortisiert die Stromeinsparung die höheren Anschaffungskosten schon nach einem Jahr. In Deutschland ist die Situation etwas anders, da hier schon seit Jahren Energie sparende Halogenlampen in Niedervolttechnik verwendet werden. Hier zu Lande ist es vor allem der geringere Wartungsaufwand für LEDs, der sie bei Verkehrsplanern immer beliebter macht.

Der grundlegende Mechanismus der Lichterzeugung wurde in den sechziger Jahren entwickelt: Ein Halbleitermaterial wird so mit Fremdatomen dotiert, dass eine Schicht reich an Elektronen ist (*n*-Bereich), eine andere reich an Löchern (*p*-Bereich, siehe Glossar). Zwischen beiden befindet sich eine Grenzschicht, in der bei Stromfluss in der richtigen Richtung beide Ladungsträger zusammenkommen und miteinander verschmelzen (fachlich „rekombinieren"). Dabei senden sie Photonen aus – die Grundeinheiten des Lichts. Die atomaren Strukturen der aktiven Schicht und des umliegenden Materials bestimmen deren Zahl und Wellenlänge.

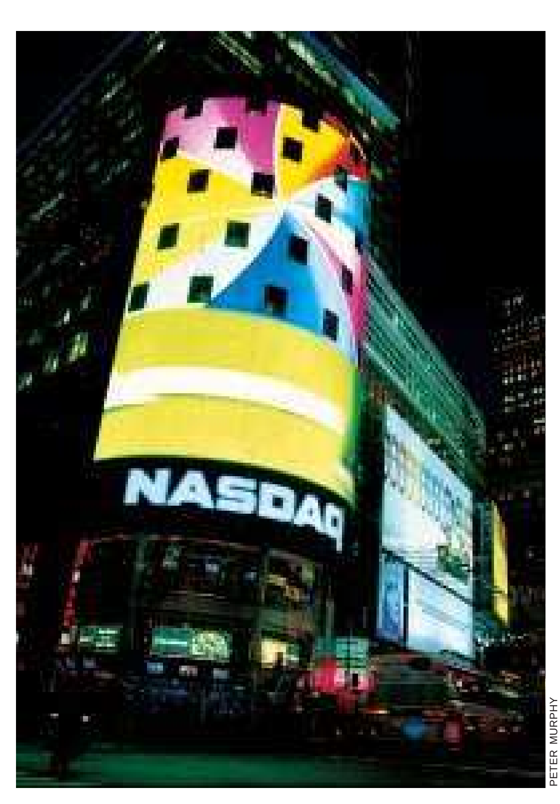
Bei den ersten Leuchtdioden, die 1960 aus einer Kombination von Gallium, Arsen und Phosphor gemacht wurden und rotes Licht hervorbrachten, arbeitete dieser Mechanismus sehr ineffektiv: Auf tausend Elektronen kam nur ein einziges Photon. So eine Leuchtdiode erzeugte weniger als zehn Prozent der Lichtmenge einer rot gefilterten Glühbirne bei gleicher Stromleistung.

Im Jahre 1999 stellten Michael Krames und seine Mitarbeiter bei Hewlett-Packard einen Rekord auf: Ihre LEDs verwandelten mehr als 55 Prozent der eintreffenden Elektronen in rote Photonen. Dieser gewaltige Fortschritt beruhte auf immer höherer Materialqualität und besseren Werkstoffen. Einen der größten Sprünge im Wirkungsgrad brachte beispielsweise die Erkenntnis, dass es besser ist, wenn jede Schicht einer LED eine andere chemische Zusammensetzung hat, als den Halbleiter homogen zu machen. Denn so verbleiben Elektronen und Löcher länger in der aktiven Zone, und die Wahrscheinlichkeit einer Rekombination wächst.

Die Forscher haben auch gelernt, die Eigenschaften der Halbleiterschichten durch Dotieren immer genauer auszulegen. In LEDs besteht der Kristall aus einer genau abgestimmten Mischung von Elementen der Gruppen III und V, wie Aluminium, Gallium, Indium und Phosphor. Zur Dotierung dienen meist Tellur und Magnesium. In den frühen siebziger Jahren waren LEDs aus Gallium-Arsenid-Phosphid bereits hell genug, um die ersten Taschenrechner oder Uhren zu beleuchten, heutige bringen je nach Zusammensetzung rotes, orangenes oder gelbes Licht hervor.

Ein weiterer Schlüssel zur Optimierung waren und sind die Herstellungsmethoden. Die Kristallstrukturen von *n*- und *p*-Materialien müssen mit denen des unterliegenden, stützenden Trägers und denen der aktiven Schicht zusammenpassen. Ein geeignetes Verfahren, dies zu erreichen, ist die Abscheidung der Materialien auf dem Substrat aus der Dampfphase. Dabei schlagen sich heiße Gase, die über den Träger strömen, darauf nieder und bilden eine dünne Schicht. Auf diese Weise werden heute qualitativ hochwertige und auch blau leuchtende LEDs produziert.

Mitte der neunziger Jahre fand ein Team von Hewlett-Packard einen Weg, die Helligkeit durch eine andere Formgebung zu erhöhen. Die Forscher entfernten den ursprünglichen Gallium-Arsenid-Wafer, auf dem die aktive Schicht gewachsen war, ersetzten ihn durch ein durchsichtiges Gallium-Phosphid-Substrat und gaben der LED die Form einer umgedrehten Pyramide. So minimierten



PETER MURPHY

Das Nasdaq-Display in New York ist der größte Videoschirm der Welt. 18 677 760 LEDs bedecken eine Fläche von fast tausend Quadratmetern.

sie interne Reflexionen, erhöhten also die Lichtmenge, die aus dem Chip austreten kann.

Dank dieser Verbesserungen gibt es auch schon kostengünstige weiß leuchtende Dioden, zwar mit geringer Leistung, doch einem Wirkungsgrad, der ein wenig besser als der einer Glühbirne ist.

Es gibt im Wesentlichen zwei Arten, weißes Licht durch Leuchtdioden zu er- ▶

Glossar

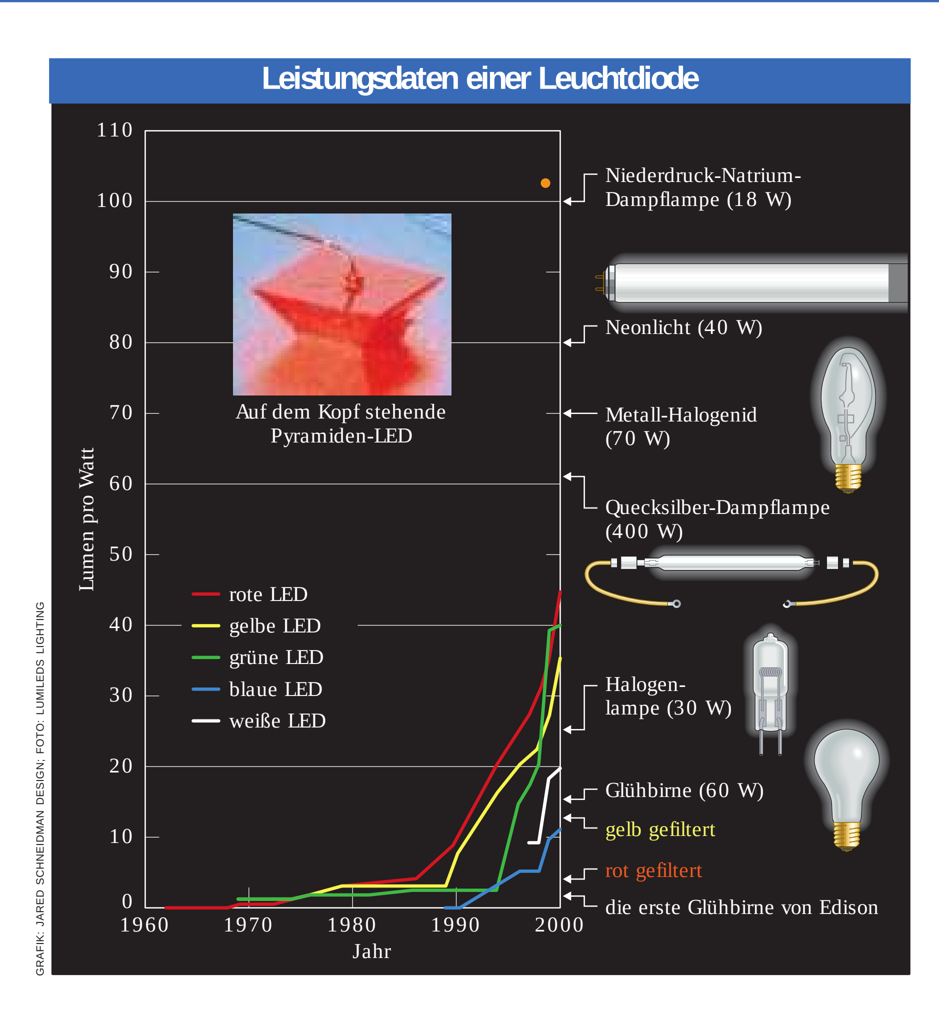
Dotieren

Wie viel Energiezufuhr ein Halbleiterkristall benötigt, um Strom zu leiten, lässt sich durch Fremdatome mit überzähligen Ladungsträgern einstellen. Als Beispiel dient das Silizium, ein Element der Gruppe IV des Periodensystems. Es besitzt vier Bindungselektronen, im Kristall teilt es sie mit seinen Nachbarn. Bringt man nun ein Atom der Gruppe III in den Kristall, beispielsweise Bor, fehlt lokal ein Elektron für die Bindung mit dem Silizium – es ist ein Loch entstanden (*p*-Dotierung). Hingegen tragen Elemente der Gruppe V des Periodensystems, wie Phosphor, ein Elektron zu viel und erzeugen somit Elektronenüberschuss (*n*-Dotierung).

Diode

Kommen ein *n*- und ein *p*-dotierter Halbleiter in Kontakt, diffundieren die jeweiligen Ladungsträger aufgrund des Konzentrationsgefälles in die Grenzschicht und rekombinieren. Zurück bleiben geladene Gitteratome, sodass sich eine elektrische Spannung ausbildet, die weitere Diffusion stoppt. Eine äußere, entgegengesetzte Spannung kann sie aufheben und neue Ladungsträger einspeisen (Durchlassrichtung).

Leistungsdaten einer Leuchtdiode



Leuchtdioden wurden ständig verbessert und übertreffen bereits einige herkömmliche Leuchtentypen. Spitzenreiter ist der Prototyp einer rot-orangenen LED in der Form einer auf dem Kopf stehenden Pyramide.

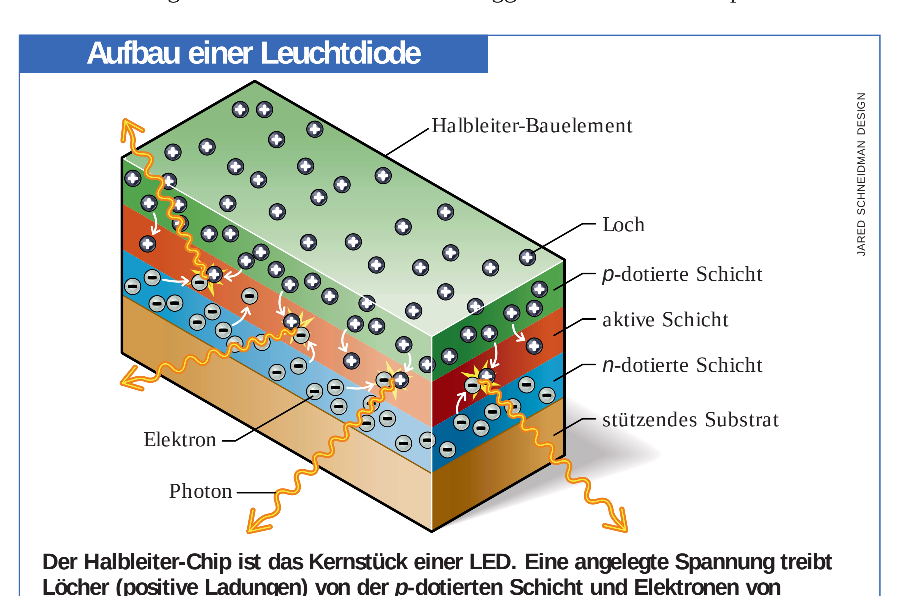
zeugen. Die eine ist, das Licht einer roten, einer grünen und einer blauen zu kombinieren, wie es das Additionsprinzip der Farbtheorie festlegt. Als problematisch erweist sich jedoch, die Farben mit hoher Effizienz und Gleichmäßigkeit zu mischen und zu kontrollieren.

Als zweite Möglichkeit kann das Licht einer Leuchtdiode Phosphor anregen. Man packt zum Beispiel Phosphor um eine blaue LED. Wenn ein Photon die Ummantelung trifft, wird der Phosphor angeregt und strahlt gelbes Licht aus, das sich mit dem blauen Licht vermischt und so weißes ergibt. Alternativ dazu kann man eine ultraviolett emittierende LED verwenden, die eine Mischung aus rotem, grünem und blauem Phosphor anregt – wieder ist das Ergebnis weißes Licht. Dieser Prozess ähnelt dem in einer Leuchtstoffröhre. Er ist einfacher, als drei Farben zu mischen, aber natürlich auch weniger effizient: Ultraviolettes Licht enthält mehr Energie als grünes oder rotes, außerdem geht Licht durch Streuung und Absorption im Phosphormantel verloren. Die Fertigung solcher Komponenten ist aber derzeit noch zu teuer: Die billigste kommerzielle weiße LED kostet heute ungefähr eine Mark pro Lumen.

Eine Gruppe um Julie Thompson von der Universität Lecce in Italien hat jüngst einen dritten Weg entdeckt, Weiß hervorzubringen. Sie bestrahlten eine Kombination von zwei eigentlich blau strahlenden organischen Molekülen mit einem ultravioletten Laser. Das Erstaunliche: Zusammen schimmerten beide weiß. Die Wissenschaftler vermuten als Grund die Bildung so genannter Exciplexe: Die eine Molekülart gibt ein angeregtes Elektron an eine andere Molekülart niedrigeren Energiezustandes ab. Erst von dort fällt das Elektron auf den Grundzustand des ersten Moleküls zurück. Es nimmt also einen Umweg, wobei beim zweiten Teilstück weniger Energie frei wird, als das beim direkten Weg der Fall wäre. Die Frequenz des emittierten Photons ist daher zum Roten hin verschoben, und es kann sich mit energiereicheren blauen Quanten zu Weiß mischen. Weil die beiden lichtaktiven Moleküle in einer Schicht gleichzeitig aufgebracht werden, wäre eine so hergestellte Leuchtdiode billiger als Dioden mit Fluoreszenzschicht. Allerdings müssen die Forscher erst noch einen Weg finden, die Anregung per Laser durch elektrische Stimulation zu ersetzen.

Immerhin: Innenarchitekten nutzen bereits flächige Anordnungen von LEDs, um das Spektrum der Raumbeleuchtung genau einzustellen – wenn es der Auftraggeber zahlt. Zum Beispiel wirkt wei-

Aufbau einer Leuchtdiode



Der Halbleiter-Chip ist das Kernstück einer LED. Eine angelegte Spannung treibt Löcher (positive Ladungen) von der *p*-dotierten Schicht und Elektronen von der *n*-dotierten in die aktive Schicht. Beim Zusammentreffen entstehen Photonen. Die chemische Zusammensetzung der Schichten bestimmt die Farbe.

ßes Licht mit höherem Blau-Anteil kühler, mehr Rot lässt es wärmer erscheinen. Das Metropolitan Museum of Art in New York illuminierte 1999 mit diesen Mitteln die Kostüme des Beatles-Films „Sergeant Pepper“. Da LED-Licht kalt ist, bestand keine Gefahr, die kostbaren Objekte zu schädigen. Fotografen werden solche künstlichen Lichtquellen begrüßen, können sie doch dann auf Filter oder besonders beschichtete Filme verzichten. Auch die Krebstherapie könnte profitieren: Bei der so genannten fotodynamischen Behandlung erhalten die Patienten spezielle Medikamente, die vor allem von Tumorzellen aufgenommen werden, und die, nachdem sie Photonen bestimmter Wellenlänge eingefangen haben, diese Zellen schädigen. Mit LEDs ließe sich das präziser steuern.

Leistungsstärkere LEDs für die Raumbeleuchtung sind Gegenstand intensiver Forschung. Gelingt es, ihre Kosten so weit zu senken, dass sie für den Massenmarkt attraktiv werden, dürften die zerbrechlichen, kurzlebigen und ineffektiven Glühbirnen kaum noch Chancen haben. Die Verbraucher profitierten direkt durch Einsparungen und indirekt natürlich durch die Entlastung der Umwelt. Insbesondere der Energiegroßverbraucher USA könnte sein Stromaufkommen drastisch verringern: Bei einem Anteil der Raumbeleuchtung von zwanzig bis dreißig Prozent am Stromverbrauch würden weiße LEDs – sofern sie einen Wirkungsgrad wie heutige rote erreichen – den alljährlichen Kohlendioxid-Ausstoß amerikanischer Kraftwerke um 300 Millionen Tonnen verringern.

Auf das Unternehmen, das als Erstes preisgünstige weiße LEDs anbieten kann, wartet ein Weltmarkt von etwa zwölf Milliarden US-Dollar. Dementsprechend investieren die großen Firmen auf dem Leuchtmittelmarkt – Philips, Osram und General Electric – viel Geld in die Leuchtdiodenforschung und -entwicklung, und ständig werden neue Unternehmen gegründet. Aber es wird noch zehn bis zwanzig Jahre dauern, bis LEDs im großen Stil herkömmliche Beleuchtung werden verdrängen können. ■

***M. George Craford**, der als Erster eine gelbe LED präsentierte, ist Technischer Leiter von LimiLeds Lighting in San José (Kalifornien). **Nick Holonyak jr.** lehrt Elektro- und Computer-Technik sowie Physik an der Universität von Illinois. Er erfand die rote Gallium-Arsenid-Phosphid-LED. **Frederick A. Kish jr.** zeichnet für LED-Entwicklung sowie -herstellung bei Agilent Technologies verantwortlich. Zu seinen Verdiensten gehört die Entwicklung rot-orange-gelber LEDs, die erstmals den Wirkungsgrad ungefilterter Glühbirnen übertrafen.*

Literaturhinweise

Halbleiter-Optoelektronik. Von Wolfgang Bludau. Hanser Fachbuchverlag, 1995.

Nonclassical Light from Semiconductor Laser and LED. Von J. Kim et al. Springer, 2001.

LEDs light the Future. Von Neil Savage in: Technology Review, Bd. 103, Nr. 5, S. 38, September/Oktober 2000.

Replacing the Light Bulb. Von Charles T. Whipple in: Photonics Spectra, Bd. 33, Nr. 12, S. 104, Dezember 1999.

ENERGIEOPTIMIERUNG

Sparsame Dauerbrenner

Kleiner, heller, wirtschaftlicher und haltbarer – die gute alte Glühlampe hat viel Konkurrenz bekommen.

Von Dörte Otten

Mit seiner Kohlefadenglühlampe brachte Thomas Alva Edison (1847–1931) Ende des 19. Jahrhunderts Licht in Haushalte, Fabriken und öffentliche Einrichtungen. Rund 120 Jahre später ist die Glühlampe immer noch die beliebteste Lichtquelle, obwohl sie nur etwa fünf Prozent der zugeführten elektrischen Energie in Licht umwandelt (eine 40-Watt-Birne liefert etwa 11, eine 60-Watt-Birne 14,5 Lumen pro Watt), den Rest in Wärme. Doch das ist nicht das einzige Problem: Der Glühfaden, meist eine Wolframwendel, muss auf rund 2500 Grad Celsius erhitzt werden, damit er sichtbares Licht aussendet, dabei dampft aber Material ab. Das schwärzt nicht nur den Lampenkolben – die wenige hunderstel Millimeter „dicke“ Wendel wird nach durchschnittlich tausend Betriebsstunden an manchen Stellen so dünn, dass sie durchbrennt.

Dieses Problem behebt ein Zusatz von Halogen, meist Brom. Er reagiert mit den verdampften Wendelpartikeln zu Wolframbromid, das beim Auftreffen auf den heißen Glühfaden wieder zerfällt, wodurch dieser sich teils regeneriert. Das erlaubt höhere Betriebstemperaturen, damit eine bessere Lichtausbeute (10 Prozent Wirkungsgrad und bis zu 30 Lumen pro Watt) und ein Farbspektrum, das dem von Tageslicht ähnlicher ist als das des „klassischen“ Glühlampenlichts.

Neueste Halogenlampen haben eine spezielle Beschichtung des Kolbens, die ▶

Bei herkömmlichen Leuchtstofflampen (unten) entsteht das Plasma durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen zwei Elektroden, bei der elektrodenlosen Hochleistungslampe (rechts) wird die Energie von außen durch magnetische Wechselfelder eingekoppelt.


PHILIPS LICHT

Die historische Speicherstadt im Hamburger Freihafen wird wirkungsvoll mit fast tausend Lichtpunkten in Szene gesetzt, jeder davon verbraucht durchschnittlich nur 25 Watt.

sichtbares Licht durchlässt, Infrarotstrahlung aber auf die Wendel zurückwirft (so genannte IRC-Halogenlampen bei Osram, Masterline ES bei Philips). Dadurch steigt die Temperatur des Glühfadens ohne zusätzliche Energiezufuhr – vorausgesetzt Kolben und Wendel sind geometrisch exakt gearbeitet. Ergebnis: Die Lichtausbeute wächst um etwa dreißig Prozent. Schon eine 35-Watt-Lampe gibt so viel Licht wie eine herkömmliche 50-Watt-Halogenbirne, bei einer Lebensdauer von etwa 4000 Stunden. Weitere Verbesserungen erhoffen sich die Hersteller von transparenten Keramiken als Ersatz für das Quarzglas des Kolbens – sie könnten mit noch höheren Temperaturen belastet werden und hielten noch länger.

Die wirtschaftlichere Konkurrenz kommt ohne jeglichen Glühdraht aus: Bei Bogen-, Metalldampf- und Leuchtstofflampen entsteht das Licht nach Anregung von Gasmolekülen in einem Elektronen-Ionen-Gemisch (Plasma) bei nur geringem Energieverlust durch Wärme. Die effektivste Lichtquelle scheidet allerdings wegen ihrer schlechten Lichtfarbe für normale Beleuchtungszwecke aus: Hochdruck-Natriumdampflampen strahlen gelbes Licht mit Ausbeuten von über 100 Lumen pro Watt ab. Ihr fahles Licht eignet sich gut, um Bahnanlagen und Fernstraßen zu beleuchten.

Bogenentladungen im Kleinformat erhellen immer mehr Autofahrern den Weg. Nach der Zündung durch einen Hochspannungspuls brennt im xenongefüllten Glaskolben ein millimeterkurzer Dauerblitz. Xenon als Füllgas leuchtet bei mehr als 6500 Grad Celsius heller als das Sonnenlicht, mit einem ins Blaue verschobenen Spektrum.

Sieben Jahre Dauerlicht

Die so genannten Energiesparlampen sind Kompakt-Leuchtstofflampen mit integrierter Zündelektronik. Aus dem Niederdruckplasma im Inneren der Röhre senden angeregte Quecksilberatome UV-Strahlung aus, die von der Leuchtstoffbeschichtung in sichtbares Licht umgewandelt wird .

Moderne Markenprodukte ähneln in der Lichtfarbe dank ausgetüftelter Phosphorleuchtstoffe immer mehr den Glühbirnen, bieten aber Lebensdauern bis zu 15000 Stunden und Lichtausbeuten von in der Regel 50 Lumen pro Watt. Gegenüber der Glühbirne ist der Verbrauch also um den Faktor fünf reduziert. Da macht sich der höhere Anschaffungspreis schnell bezahlt.

Generell vertragen Leuchtstofflampen ein Ein-und-Ausschalten in kurzen Zeitabständen nicht, denn bei jedem Zünden erodiert die dafür vorgesehene Wendel. „Ein Kaltstart nach 30 Minuten ist für Energiesparlampen kein Problem“, erläutert Frank Hohn, Produktmanager bei Osram, „wenn die Zündwendel aber nicht wenigstens 15 Sekunden abkühlen kann, werden die Bauelemente auf der Platine extrem belastet.“

Neu sind Hochleistungslampen mit geschlossener Glasröhre, die ohne Elektroden funktionieren und somit fast verschleißfrei sind. Die Energie wird durch magnetische Induktion (Osram Modell Endura) oder per Hochfrequenzantenne (Philips Modell QL) von außen eingekoppelt. Ihre Lebensdauer beträgt 60000 Stunden, das entspricht im Dauerbetrieb knapp sieben Jahren – gegenüber 10 bis 22 Monaten bei herkömmlicher Bauart. Besonders geeignet seien die nicht ganz billigen Systeme vor allem für hohe Räume, etwa in Flughäfen, Industriehallen oder Bibliotheken. ■

Dörte Otten *ist promovierte Biophysikerin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin und Fachlektorin in München.*

LEUCHTDIODEN

Bildschirm aus Plastik

Brillant in den Farben, dabei dünn und womöglich biegsam, so sollen die Displays von übermorgen sein. Das Rezept: Leuchtdioden aus Kunststoff.

Von Norbert Aschenbrenner

Noch sind flexible Monitore etwa für Handys Zukunftsmusik, aber schon in wenigen Jahren, so die Hoffnung namhafter Unternehmen, soll diese Technik marktreif sein (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 10/2001, S. 76). Mit heute üblichen Halbleiterelementen (LEDs) oder Flüssigkristallanzeigen (LCDs) geht so etwas allerdings nicht. Künftige Displays nutzen vermutlich kleinere organische Moleküle bis hin zu großen, also Polymeren, die elektrisch zum Leuchten angeregt werden.

Die Basis bilden organische Leuchtdioden (OLED). Der Aufbau eines Displays daraus ist einfach: Es gibt zwei Elektroden, dazwischen ein Material, das bei Stromdurchfluss leuchtet. Die Elektroden bestehen aus Gittern feiner elektrischer Leitungen, jeder Kreuzungspunkt eines solchen Gitters definiert einen Bildpunkt (fachlich „Pixel"). Dem Betrachter zugewandt ist die Anode (also die Elektrode, an der die positive Spannung anliegt). Dementsprechend muss sie durchsichtig sein, sie besteht deshalb aus Indium-Zinn-Oxid. Die Kathode besteht aus einem unedlen Metall, etwa Magnesium oder Kalzium. Zwischen beiden liegt die aktive Schicht aus Kunststoff, dessen Elektronen die Energie des Stroms aufnehmen und als Strahlung im sichtbaren Bereich abgeben. Die chemische Zusammensetzung und Struktur des Materials bestimmen die Farbe. Der gesamte Aufbau wird auf Glas oder einem biegsamen Träger aufgebracht und ist luftdicht verkapselt.

Mitte der 1980er Jahre präsentierte Kodak die erste OLED aus kleinen, organischen Molekülen, einige Jahre später folgte im englischen Cambridge die erste aus Kunststoff. Mittlerweile gibt es erste Produkte in einem Autoradio von Pioneer und einem Motorola-Handy. Der Umsatz mit OLED-Displays soll nach einer Marktstudie von DisplaySearch bis 2005 auf 3,3 Milliarden Dollar steigen – wenn das leuchtende Plastik beginnt, übliche Bildschirmtechniken abzulösen.

„Wer einmal so ein Display gesehen hat, der weiß, warum wir in diesen Markt investieren", sagt Wolf Jakowetz, der bei Osram Opto Semiconductors in Regensburg die OLED-Aktivitäten in Europa leitet. Der Physiker zählt die Vorteile auf: Bei einer Spannung von fünf Volt leuchten die Kunststoffe viel heller und brillanter als die üblichen Flüssigkristallschirme (LCD-Displays). Außerdem

sind sie einfacher aufgebaut (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 117). Auch wenn man die Monitore hochauflösend macht, also beispielsweise ein entsprechend feines Elektrodengitter vorsieht, bleiben sie dennoch etwa einen Millimeter dünn. Ein weiterer Vorteil ist der weite Betrachtungswinkel, wie Walter Rieß vom IBM-Forschungslabor in Rüschlikon betont: „Die OLEDs wirken aus jeder Richtung gleich hell." Bildschirme aus LCDs hingegen lassen sich bei schrägem Blickwinkel kaum noch ablesen.

Der Markt ist in Gang gekommen. Sony zeigte auf der Fachmesse der Society of Information Displays (SID) im Juni dieses Jahres ein etwa Laptop-großes Farbdisplay mit einer Auflösung von 800 mal 600 Pixel jeweils in den Grundfarben Rot, Grün und Blau. Toshiba will mit seinem 2,85 Zoll großen Display Anfang 2002 in die Serienfertigung gehen.

Die Forscher von Siemens und Osram Opto Semiconductors haben eine Möglichkeit gefunden, die Produktion weiter zu verbessern. Bisher kamen Polymere durch Aufschleudern (fachlich *spin coating*) einer Lösung auf den Grundträger. Dieser dreht sich schnell, sodass sich die Tropfen gleichmäßig verteilen. Doch rund 90 Prozent des Materials fließen aufgrund der Rotation am Rand der Platte herunter. Das Team von Georg Wittmann in Erlangen entwickelte ein Siebdruckverfahren, das die Beschichtung größerer Platten ermöglicht, Arbeitsschritte einspart und 90 Prozent der eingesetzten Substanz verwertet.

Der deutsche Hersteller Covion, ein Joint Venture der Chemieunternehmen Celanese und Avecia, will zudem bereits Anfang 2002 Grundmaterialien für Displays anbieten, bei denen erstmals jedes Pixel eine andere Farbe haben kann. Die Wissenschaftler versuchen zudem, deren Temperaturbeständigkeit weiter zu verbessern. Die Lebensdauer eines OLED-Displays beträgt bei Zimmertemperatur mittlerweile mehrere zehntausend Stunden – das reicht für die Praxis aber noch nicht aus.

In puncto Effizienz gelang Stephen Forrest von der Universität in Princeton ein großer Schritt. Er nutzt neben dem energiereicheren „Singulett"- auch den „Triplett"-Zustand bestimmter organischer Materialien für die Emission von Licht. In ersterem haben die Elektronen entgegengesetzten Drehimpuls. Im Triplett-Zustand ist er parallel und besitzt eine geringere Energie, ist aber dreimal so häufig, da es mehr Möglichkeiten für die Besetzung der Elektronenniveaus gibt – die Lichtausbeute ist dadurch insgesamt höher. Forrest aktivierte den Triplett-Zustand über eine Dotierung mit Schwermetallkomplexen, die Platin oder Iridium enthalten. So steigerte er die Effizienz seiner OLED um den Faktor vier (vergleiche auch Spektrum der Wissenschaft 10/1995, S. 106). ▶



Kunststofffolien sollen der Stoff sein, aus dem künftig Monitore beispielsweise für Handys gebaut werden.

Derzeit gibt es flexible Monitore nur als Prototypen. Bis zur Serienproduktion können noch Jahre verstreichen. Auch die Verkapselung bereitet den Forschern noch Kopfzerbrechen. Als Trägermaterialien kommen dichte Kunststoffe oder biegsame Gläser in Frage. „Die Technik ist aber so einfach, dass sie auch bei flexiblen Trägern funktionieren müsste", sagt Olaf Gelsen von Covion.

Der promovierte Chemiker **Norbert Aschenbrenner** *arbeitet als Journalist in Markt Schwaben bei München.*

RECYCLING

Sondermüll oder Wertstoff?

Viele Lichtquellen enthalten umweltgefährdende Stoffe, doch es gibt Wege für eine weitgehende Verwertung.

Von Sylvia Trage

Auch die beste Lampe hat irgendwann ihre Schuldigkeit getan und muss fachgerecht entsorgt werden. Konventionelle Glühlampen sowie Halogen-Glühlampen bestehen nur aus Metall und Glas und dürfen deshalb in den Hausmüll. Das gilt auch für viele moderne Speziallampen ohne umweltgefährdende Stoffe wie die mit Xenon gefüllten Flachlampen (PLANON) von Osram oder die neuen Hochdruck-Natriumdampflampen (SON-PIA) von Philips. Dagegen enthalten Leuchtstofflampen umweltgefährdendes Quecksilber (siehe Beitrag auf Seite 81). Auch wenn es den Herstellern gelang, die notwendige Menge durch raffinierte Dosiertechniken bei der Herstellung zu verringern – ausgediente Lampen mit Quecksilber sind Sondermüll. Aber auch sie lassen sich teilweise recyceln.

Die Arbeitsgemeinschaft Lampenverwertung (AGLV) unterscheidet bei der Wiederaufbereitung zwischen Shreddern sowie Zerlegen nach dem Kappen-Trenn-Verfahren. Mit ersterem lassen sich nicht nur alle Lampentypen, sondern auch Glasbruch oder Produktionsabfälle verarbeiten. Ein Brechersystem zerkleinert die Lampen und anschließend teilt eine Siebmaschine den Bruch in drei Korngrößen auf. Die erste Fraktion (größer als acht Millimeter) besteht aus den Aluminiumkappen. Die Glasfraktion mit Korngrößen von etwa fünf Millimeter wird nach zweifachem Absieben der Leuchtstoffe direkt abgefüllt und kann zum Beispiel in Glasbausteinen oder Isolierglaswolle wieder eingesetzt werden. Abgesiebtes Leuchtstoffpulver und Glasstaub (kleiner als ein Millimeter) bilden schließlich den dritten Teilbruch, der sich durch Vakuumdestillation vom Quecksilber befreien lässt. Der Rest wird als Sonderabfall entsorgt.

Beim Kappen-Trenn-Verfahren werden ausgebrannte stabförmige Leuchtstofflampen zunächst der Länge nach sortiert und die Röhren mit Hilfe eines Lochbrenners belüftet. Dann kann man die Lampenenden – bestehend aus dem

Sockel mit Glasfuß, Stromzuführungen und Elektroden – durch Brenner absprengen. Leuchtstoffpulver und Quecksilber werden gemeinsam aus dem nun geöffneten Lampenkolben ausgeblasen. Aktivkohle filtert Quecksilber-Gas heraus, flüssige Anteile landen beim Leuchtstoff. Der Lampenkolben wird mit Druckluft gereinigt, zerbrochen und einem magnetischen Metallabscheider zugeführt, um absolute Metallfreiheit zu gewährleisten. Das jetzt saubere Kolbenglas kann bei der Herstellung von Glasrohren für neue Leuchtstofflampen mit eingesetzt werden. Auch Metalle sowie moderne LUMILUX-Leuchtstoffe, also hochgeglühte Gemische von mit Seltenen Erden aktivierten Leuchtstoffen, lassen sich in der Lampenproduktion erneut verwenden. Dagegen endeten bisher Standardleuchtstoffe, Gläser des Lampenfußes mit Elektroden, Kappen und Gestelle auf der Deponie.

In einem Pilotprojekt versuchen Osram und die norwegisch-schweizerische HAS-Gruppe auch diese Reststoffe zu nutzen. So werden beispielsweise Bleiglas-Teller des Lampenfußes mit Gestell oder Kappen von stabförmigen Leuchtstoffröhren, aber auch andere quecksilberhaltige Alt-Entladungslampen zunächst feingemahlen, dann Metalle magnetisch abgetrennt und die wesentlich leichteren Kunststoffe weggeblasen. Das übrige Glas und auch anhaftender Leuchtstoff werden bei über 6000 Grad Celsius in einem Argon-Plasmaofen eingeschmolzen und in wasserunlösliche Silikate umgewandelt. Diese wenn auch energieaufwändige Technologie des Verglasens bietet den Vorteil, dass bei so hohen Temperaturen und Ausschluss von Sauerstoff im Schmelzprozess keine Dioxine und Furane entstehen. Ferner sind Materialunterschiede nicht mehr relevant, denn bei einer solchen Hitze schmilzt einfach alles.

Das verglaste Material können Baufirmen oder Straßenbauer direkt oder nach Weiterbehandlung zu Schaumglas etwa zur Isolierung oder für den Trassenunterbau verwenden. Dazu wird es granuliert und mit Siliziumpulver versetzt. Im Hochtemperaturofen bei Temperaturen von bis zu tausend Grad Celsius quellen die Glaspartikel dann schaumig auf. Wer weiß, vielleicht rollen Sie demnächst auf ihrer alten Leuchtstoffröhre in den Urlaub? ■

Sylvia Trage studierte Wirtschaftsingenieurwesen/Elektrotechnik und promovierte im Fach Maschinenbau. Sie ist Mitgesellschafterin eines ungarischen Beratungsunternehmens.

PSYCHOLOGIE

Wohl fühlen oder konzentrieren?

Das optimale Lichtdesign für jede Gelegenheit gibt es nicht.

Licht beeinflusst die Seele, kann Depression vertreiben und die Leistungsfähigkeit steigern, aber auch die gegenteiligen Effekte haben. Spektrum der Wissenschaft sprach mit Dr. Christoph Schierz. Der Physiker leitet am Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie der ETH Zürich die Forschungsgruppe „Physikalische Umwelt“, die sich mit den psychischen Wirkungen der Beleuchtung befasst.

Spektrum der Wissenschaft: *Muss eine künstliche Raumbeleuchtung nicht immer schlechter als das natürliche Tageslicht sein?*

Christoph Schierz: Nein, nicht unbedingt. Wir wissen zwar, dass ein Büroraum mit zu kleinen Fenstern Unbehagen auslöst. Doch liegt das wohl weniger an einer Überlegenheit von Sonnenlicht gegenüber Kunstlicht. Man schaut durch das Fenster und erlebt den tageszeitlichen Lichtwechsel, erfährt das Wetter oder sieht irgendwelche Geschehnisse. Das Tageslicht stellt also eine Verbindung zur Außenwelt her. Es bestimmt jedoch nicht allein, ob ein Lichtmilieu als angenehm erlebt wird.



Spektrum: *Ein schlechtes dagegen mindert sogar die Leistungsfähigkeit?*

Schierz: Das stimmt. Aus Studien in Industriebetrieben ist schon seit langem bekannt, dass bei mangelhafter Beleuchtungsstärke die Arbeitsgeschwindigkeit sinkt und die Fehlerrate wächst – natürlich besonders dann, wenn für die Arbeit ein präzises Sehen erforderlich ist. Ungünstig wirken auch Lichtspiegelungen und Blendeffekte, insbesondere bei der Bildschirmarbeit.

Spektrum: *Deshalb ziehe ich vermutlich beim Schreiben am Computer eine indirekte Beleuchtung vor?*

Schierz: Diese Vorliebe teilen Sie mit vielen. Sowohl bei Laborversuchen als auch unter realen Arbeitsbedingungen in Büros hat sich gezeigt, dass eine helle und indirekte Beleuchtung meist angenehmer wirkt. Allzu direktes und schwaches Licht wird als unangenehm erlebt. Allerdings scheint indirektes Licht auch zu beruhigen, während eine direkte, aber starke Beleuchtung eher munter macht.

Spektrum: *Wie wäre denn die optimale Beleuchtung?*

Schierz: Das hängt von der Tätigkeit ab. Bei Gesprächen im Büro bevorzugen viele ein indirektes und warmes Weißlicht mit einer gelblich-rötlichen Tönung. Offenbar fördert es den verbalen Austausch und das konzentrierte Nachdenken. Für das Arbeiten am Schreibtisch dagegen scheint direkteres und eher bläuliches Tageslichtweiß geeigneter zu sein. Es gibt also kein einheitliches Patentrezept für alle Situationen.

Spektrum: *Ältere Menschen sollen für dieselbe Tätigkeit mehr Licht als jüngere benötigen. Müsste die Raumbeleuchtung dann nicht ganz individuell gestaltet werden?*

Schierz: Nicht nur das. Sie sollte sich wahrscheinlich auch bei ein und derselben Person im Tagesverlauf verändern: morgens eher ermunternd, abends eher entspannend wirken und sich zudem an die Wetterlage anpassen.

Spektrum: *Würde sich ein solcher Aufwand auszahlen?*

Schierz: In der Tat ließen sich dadurch unsere Arbeitswelten verbessern. Leider hätten wir zwar die technischen Möglichkeiten, doch die psychischen Wirkungen der Lichtgestaltung sind noch viel zu wenig erforscht. Bisher wurde Beleuchtung oft einseitig als technisches Problem betrachtet. Aber sie ist weit mehr als das.

Interview: ***Martin Lindner****,*
Wissenschaftsjournalist in Berlin

Bartenbach Lichtlabor

„Wesentlich ist das Beleuchtete“



Um die Wirkung verschiedenfarbiger Raumbeleuchtung auf die Leistungsfähigkeit zu testen, kombinierten die Wissenschaftler entsprechende Leuchtdioden von Osram zu Leuchtflächen.

Eine röhrenförmige Lampe an der Decke macht den fensterlosen Raum im Untergeschoss des österreichischen Unternehmens taghell. „Wir befinden uns zwar im Keller, das Licht kommt aber von der Sonne“, kommentiert Christian Anselm vom Bartenbach Lichtlabor in Aldrans bei Innsbruck. Ein so genannter Heliostat, ein Spiegel, der dem Lauf der Sonne nachgeführt wird, fängt deren Strahlen an der Außenseite des Gebäudes ein, weitere Spiegel und Linsen bringen sie bis in die Röhre, die das Licht dann im Raum verteilt. Auf seinem Weg wird der Strahl von rund eineinhalb Metern Durchmesser Platz sparend auf ein Fünfunddreißigstel der Fläche gebündelt.



ALLE FOTOS: BARTENBACH LICHTLABOR

Verschiedene Spiegel bringen Sonnenlicht bis in den Keller des Labors.

Anselm drückt einen Knopf, und das Licht verwandelt sich. Zwar bleibt es fast genauso hell wie zuvor. Doch bekommt es einen rötlichen Farbton und wirkt künstlich. Der Physiker hat nichts anderes getan, als den Heliostaten aus der Sonne zu drehen, das Licht kommt jetzt aus Leuchtstoffröhren. Obwohl der Raum immer noch gut ausgeleuchtet ist, stellt sich ein „Keller-Gefühl“ ein. Der Lichtexperte positioniert den Heliostaten wieder richtig: Sofort „geht die Sonne auf“. „Mit einer solchen Beleuchtung könnten aus Lagerräumen in Kellern vollwertige Besprechungszimmer werden“, erläutert Anselm. Das zu beweisen, war Zweck eines EU-Projektes, das in dem Sonnenraum des Lichtlabors durchgeführt wurde.

Mit umgelenktem Sonnenlicht arbeiten die Innsbrucker Wissenschaftler häufiger. Christian Bartenbach, Gründer und Seniorchef der Firma, berichtet von einem Projekt für die Bayerische Versicherungskammer, bei dem Spiegel sowie reflektierende Lamellen Licht und Wärme in einen recht engen Innenhof bringen. Künstliche Beleuchtung könne mit natürlicher niemals mithalten, davon ist der studierte Elektroingenieur zutiefst überzeugt – sofern die Sonne nicht blendet und stört.

Am Labor in Aldrans befindet sich ein zweiter Heliostat. Dessen Strahl landet in einer Messkammer. So können die Forscher deren Fenster in jedem beliebigen Winkel zum Sonnenlicht drehen und ermitteln, wie viel Wärme sie durchlassen. „Das Klima lässt sich von der Beleuchtung nicht trennen“, meint Anselm. In vielen Büros etwa würden die Leute an heißen Tagen Jalousien und Rollläden herunterziehen, damit sich die Räume nicht so aufheizen. Oft müssten sie dann mitten im Sommer das Licht einschalten. Dabei geht es auch anders, wie in der Messkammer des Lichtlabors zu sehen ist: Dort befindet sich ein Fenster mit einer Jalousie, deren gekrümmte Lamellen aus einem Aluminium bestehen, das die Forscher schon in den eigenen Büros getestet haben. Das Ergebnis: Der Raum bleibt kühl, trotzdem fällt genug Licht zum Arbeiten hinein. Damit man noch hinausgucken kann, sind in das Material winzige Löcher gebohrt.

Fenster mit Sonnenschutz lassen sich in dem österreichischen Labor nicht nur vermessen, sondern auch sozusagen beim Einsatz begutachten: In einem rundum verglasten würfelförmigen Gebäude mit acht Metern Kantenlänge ist es den Lichtspezialisten möglich, jeden Büroraum im Handumdrehen nachbilden, Jalousien und Beleuchtung in realistischer Umgebung bei Sonne, Bewölkung, Regen und Schnee erproben. Und der Kunde könne ein neues Beleuchtungssystem gleich am eigenen Leib erleben, erläutert Robert Gratzel.

Stolz präsentiert der Geschäftsführer ein weiteres Keller-Besprechungszimmer. An der Decke strahlen Hunderte von kleinen Lämpchen, die Hälfte davon weiß, die andere gelb, blau, grün und rot. „Das ist der erste Raum, der vollständig mit Leuchtdioden beleuchtet wird“, erklärt Gratzel. Noch finden sich solche Dioden nur in Armaturenbrettern, Anzeigetafeln und vereinzelt in Ampeln. Künftig könnten sie indes die heute üblichen Glühbirnen und Leuchtstoffröhren verdrängen. Denn sie brauchen weniger Strom und gehen nicht so schnell kaputt. „Indem die Leuchtdioden der vier Farben einzeln gedimmt werden, lässt sich das Licht zudem in seiner spektralen Zusammensetzung verändern.“ Zu Hause könne man mit der neuen Technik die Wohnung je nach Stimmung gestalten und etwa eine Wand an einem Tag gelb machen, am nächsten rot.



Das Unternehmen im Profil

Neben dem Hauptsitz in Aldrans unterhält das Bartenbach Lichtlabor Niederlassungen in München, Berlin und der Schweiz. Partnerschaften bestehen in Südkorea, Italien und Brasilien. Der Jahresumsatz beträgt 11,4 Millionen Mark; pro Jahr bearbeitet das Unternehmen rund hundert Projekte. Zusätzlich zur Planung von künstlicher und natürlicher Beleuchtung, von der Konzeption bis zur Objektüberwachung, entwickelt die Firma eigene Produkte. Die sechzig spezialisierten Mitarbeiter verteilen sich auf die Bereiche Projektierung, Forschung & Entwicklung, Wahrnehmungspsychologie und Modellbau.

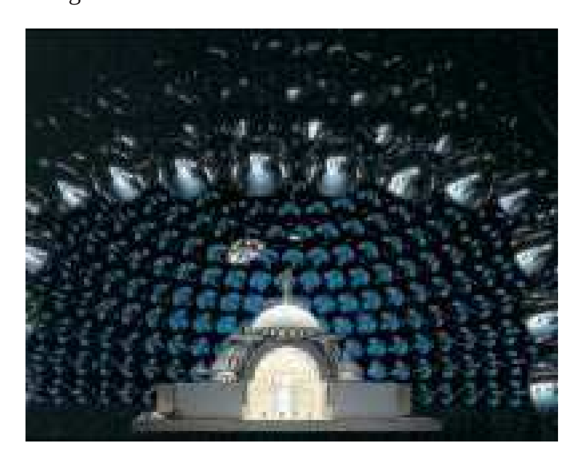
Welchen Einfluss die Lichtfarbe auf die Leistungsfähigkeit hat, darüber weiß Walter Witting zu berichten. Der Psychologe am Lichtlabor hat an rund 1400 Versuchspersonen getestet, bei welcher Beleuchtung Menschen am Computer am effektivsten arbeiten.

Dazu mussten Probanden typische Aufgaben bewältigen, zudem hängte sie Witting an einen Lügendetektor – um ihren Hautwiderstand zu messen –, ermittelte die Muskelspannung im Augen- und Stirnbereich und bestimmte, wie schnell sie ermüdeten. Aus den Ergebnissen hat er folgende Empfehlungen formuliert: Das Licht sollte nicht blenden und der Helligkeitsunterschied zwischen Fenster und Bildschirm möglichst gering sein, damit sich das Auge nicht ständig umgewöhnen muss. Die Decke darf nicht zu hell sein. Als Lichtfarbe empfiehlt sich ein neutrales Weiß. Bei leicht rötlicher Beleuchtung etwa ermüdeten die Probanden schneller, arbeiteten langsamer und machten mehr Fehler.

Sogar die Tischfarbe erforschten Witting und seine Mitarbeiter. Am besten schnitt hier ein mittleres Grau ab. „Die Beleuchtung von Büros mit weißen Wänden haben wir zwar ausgeforscht“, meint Witting. Zu untersuchen gäbe es dennoch genug, etwa andere Wandfarben oder Räume mit Strukturtapete.

Die 1976 gegründete Firma hat zudem die ausgeklügelte Beleuchtung einer Vielzahl spektakulärer Bauten entworfen. Die Referenzliste reicht vom Bonner Haus der Geschichte über den Leipziger Hauptbahnhof und den Frankfurter Flughafen bis zum Rundgang um die Kaaba in Mekka. Nur eines fehlt in der Liste: der Berliner Reichstag mit seiner Lichtkuppel. Wäre er an der Planung beteiligt gewesen, sähe das Bauwerk anders aus, sagt Christian Bartenbach. Die Lichtöffnung sei zu klein. Überdies nutze die Konstruktion nur schräg einfallendes Sonnenlicht. „Der Beweis: Der Reichstag kommt nicht ohne Kunstlicht aus.“ Von der Bedeutung guter Planung ist Bartenbach überzeugt. „Achtzig Prozent der Informationen, die der Mensch aufnimmt, kommen über Licht in den Kopf.“ Das Licht sei dabei kein Selbstzweck, und es komme auch nicht auf die Lampe an: „Wesentlich ist das Beleuchtete.“ ■

Wolfgang Blum



Tageslicht soll die neue Moschee Wilayat in Kuala Lumpur (Malaysia) mittels eines Heliostaten erhellen, der Sonnenlicht an einen Deckenluster weiterleitet. Mit einem „künstlichen Himmel“ simulierte das Lichtlabor die Beleuchtung und damit die Stimmung in der Moschee.

Report: Terror und Trauma

Die Terroranschläge vom 11. September haben die Welt erschüttert. Fanatische Extremisten schrecken nicht mehr davor zurück, Massenmord mit Tausenden von Opfern als Mittel für ihre Zwecke einzusetzen. Unsere Gesellschaft steht damit vor einer gänzlich neuen Herausforderung.



DPA

SICHERHEITSPOLITIK

Das Übel an der Wurzel packen

Die Sicherheitspolitik muss sich darauf einstellen, dass Terroristen versuchen werden, den „Taterfolg“ von New York und Washington noch zu übertreffen.

Von Harald Müller

Der Schock sitzt tief. Es wird lange dauern, bis die Bilder des 11. September verarbeitet sind. Ein beispielloser Anschlag – ein strategisch geplanter, medial inszenierter Massenmord. Diese Attacke hat die gegenwärtig größte Gefahr für unsere Sicherheit offenbart: einen „Megaterrorismus“, der hinsichtlich des Schadensausmaßes und der Zahl der Opfer keine Grenzen mehr kennt. Traditionelle Konflikte treten vor dieser Gefahr zurück. Die Sicherheitspolitik muss deshalb ihr Instrumentarium neu überdenken.

Der Kampf gegen den Megaterrorismus muss damit beginnen, dass wir im eigenen Denken Klarheit und Geradlinigkeit schaffen. Die erste Reaktion nach den Anschlägen in New York und Washington war von starken Emotionen geprägt. Politiker und Kommentatoren ließen sich dadurch zu manchen unbedachten Äußerungen hinreißen. Von „Krieg“ war die Rede, gar von einem „Kreuzzug“. Beide Begriffe sind jedoch in diesem Zusammenhang völlig fehl am Platz. Mehr noch: Sie entspringen einem falschen Denken, das die Weichen für weitere Aktivitäten in eine äußerst bedenkliche Richtung stellen könnte.

Krieg ist stets ein politischer Akt. Er wird zwischen Staaten oder zwischen einem Staat und einer anerkannten Kriegspartei – etwa einer nationalen Befreiungsbewegung – um politischer Ziele willen geführt. Und es gibt völkerrechtliche Normen, denen er unterliegt. Nichts davon trifft auf die terroristischen Verbrechen in den USA zu. Im Übrigen wünschen sich Terroristen nichts mehr als die Anerkennung als Kriegspartei. Sie sehen sich ja selbst als „Gotteskrieger“, als Soldaten in einem „heiligen“ Krieg gegen die Kräfte des Bösen. Doch Terroristen sind Verbrecher, und es ist nicht zuletzt im Hinblick auf ihr sympathisierendes Umfeld bedeutsam, sie nicht als Krieger anzuerkennen.

Dieser Erkenntnis haben sich auch die mehrheitlich moslemischen Länder nicht verschlossen. Die weltweite Unterstützung beziehungsweise Akzeptanz der Militäraktion der USA, die am 7. Oktober begonnen hat, zeigt denn auch, dass es eine multikulturelle Koalition gegen den Terrorismus gibt.

Wie geht es weiter?

Die US-Militäraktion gegen Ziele in Afghanistan und möglicherweise auch in anderen Staaten kann allerdings nur ein höchst eingeschränkter Teil einer vernünftigen Anti-Terrorismuspolitik sein. Vor allem darf sie sich nicht gegen ein Land in seiner Gesamtheit richten. Die bettelarme, von zwanzig Jahren Krieg geschundene Bevölkerung Afghanistans leidet unter der fanatischen, religiös verbrämten Diktatur und hat selbst weder an der Duldung terroristischer Gruppen noch an deren Aktivitäten Anteil. Zudem sollten die Vereinigten Staaten auch nicht verdrängen, dass sie selbst in den achtziger Jahren das Netzwerk Osama bin Ladens, später auch die Taliban selbst, aktiv unterstützt haben. Den USA kommt daher eine besondere Verantwortung zu, die Zivilbevölkerung von militärischen Aktionen zu verschonen. Eine Vergeltung muss sich strikt auf Standorte der Terroristen oder militärische Ziele ihrer Schutzmacht beschränken.

Aber was soll nun nach den Militärschlägen geschehen? Es gilt, das Übel an den Wurzeln zu packen. Doch eines muss dabei klar sein: Alle Maßnahmen der Terrorismusbekämpfung müssen mit dem internationalen Recht in Einklang stehen. Und weil die Bedrohung nicht in wenigen Wochen oder Monaten zu beseitigen ist, müssen zugleich Vorkehrungen gegen weitere Terroranschläge getroffen werden.

Dass sich der Anschlag auf das World Trade Center in ähnlicher Inszenierung wiederholt, ist allerdings wenig wahrscheinlich. Solange die verstärkten Sicherheitsvorkehrungen im Flugverkehr und in besonders gefährdeten Einrichtungen in Kraft bleiben, werden sich Attentäter eher nach anderen Möglichkeiten umsehen. Hierbei geraten fast automatisch chemische und biologische Kampfstoffe ins Blickfeld.

Um den Terrorismus in dieser Ausprägung wirksam bekämpfen zu können, ist es nötig, an seinen Ursachen anzusetzen. Vorrangig, wenn auch nur langfristig wirksam, ist die Einflussnahme auf die sozialen und kulturellen Faktoren. Terroristennachwuchs wird nämlich hauptsächlich dort rekrutiert, wo viele – vor allem junge – unzufriedene und verzweifelte Menschen ohne Perspektive leben. Auf der Suche nach einem positiven Lebensinhalt werden sie leichte Beute radikaler Gruppen, die vielleicht noch eine Rückbesinnung auf vermeintlich au-

DPA

thentische Traditionen der eigenen Kultur mit religiösem Wahn verbinden. Wenn jemand einer göttlichen Mission dienen kann, schafft dies eine mentale Sicherheit, die jedes Hinterfragen von vornherein tabuisiert.

Von allen Maßnahmen, die dieses sozial-kulturelle Umfeld verbessern können, überragt eine alle übrigen: die Bearbeitung derjenigen Konflikte, die in der moslemischen Welt die meiste Erbitterung ausgelöst haben, der Nahe Osten und Kaschmir. Vor allem der Nahostkonflikt reizt weit über die Region hinaus den Radikalismus von Moslems an. Er hat für das Verhältnis vieler Menschen im Islam zur Weltordnung und zum Westen eine enorme symbolische Bedeutung gewonnen.

Der zweite Eckpfeiler wäre nichts weniger als die Entwicklung einer Weltsozialpolitik. Den Menschen in benachteiligten Regionen der Welt müssen glaubhafte Perspektiven geboten werden, wie sie mit den Folgen der Globalisierung fertig werden können. Seit den Berichten der Brandt- und Brundtland-Kommissionen liegen eine Reihe von guten, aber nicht verwirklichten Vorschlägen vor. Ohne den Einsatz von Ressourcen werden sich Konzepte nicht in Handlungsprogramme umsetzen lassen. Insofern erschreckt es, wenn die Politik in diesen Tagen Mehrausgaben für die Bundeswehr und die innere Sicherheit beschließt, aber keine Mittel für Entwicklungsmaßnahmen bereitgestellt werden, die Krisen vorbeugen und Terrorismus eindämmen können.

Das dritte Element in diesem Umfeld ist der interkulturelle Dialog. Nur dadurch lassen sich Differenzen, Missverständnisse, Fehlwahrnehmungen und Vorurteile im Westen wie in der islamischen Welt abbauen. Der Dialog muss auf einer möglichst breiten Basis geführt werden, um tatsächlich in die Tiefe der jeweiligen Gesellschaft wirken zu können. Dem Westen als dem stärkeren Partner fällt hier eine größere Bringschuld zu. Aber die moslemische Welt muss sich bemühen, das im Westen vorherrschende Bild des religiösen Islam, das durch militante Geistliche geprägt ist, zurechtzurücken. Eine öffentliche, unmissverständliche Kampagne, unterstützt von den besten moslemischen Autoritäten, sollte klarstellen, dass die Denk- und Handlungsweisen der Terroristen mit den Lehren des Koran unvereinbar sind und sich die Täter außerhalb der Umma, der Gemeinschaft der Gläubigen, stellen.

Eine weitere Ebene der Terrorismusbekämpfung liegt in der Stärkung der inneren Vorkehrungen. Hierzu gehören die Beschaffung und Auswertung von Informationen, die Beobachtung verdächtiger Gruppen und Individuen sowie die konsequente Strafverfolgung. Dabei muss genau beobachtet werden, inwieweit die extremistische politische Szene auf beiden Seiten des Spektrums sich auswärtigen Terroristen als Kooperationspartner anbietet. Der Antiamerikanismus ist auf beiden Seiten reichlich ausgeprägt.

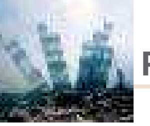
Vorbeugen mit Verstand

Wo personelle, finanzielle und technische Ressourcen der zuständigen Behörden nicht reichen, müssen sie sicherlich vermehrt werden. Maßnahmen, die wesentliche Verfassungsgrundsätze aus den Angeln heben, dürfen jetzt aber nicht überhastet in die Wege geleitet werden. Das betrifft neue innere Aufgaben der Bundeswehr genauso wie eine mögliche Aufweichung des Datenschutzes.

Selbstredend müssen die am meisten gefährdeten Objekte so gut wie möglich geschützt werden. Für Liegenschaften mit hohem Symbolwert und hohem Personalaufkommen empfiehlt es sich etwa, ▶



New York City,
11. September 2001



die Klimaanlagen und Lüftungsschächte mit Filtern in Gasmaskenqualität und mit Sensoren zu versehen, die das Auftreten ungewöhnlicher Stoffe unverzüglich melden, sodass eine Evakuierung und Dekontamination der Gebäude ohne Verzögerung eingeleitet werden kann.

Wesentlich ist auch die Bündelung der Ressourcen medizinischer Behandlung und der Dekontamination. Eine internationale Zusammenarbeit ist hierbei ein unverzichtbares Muss. Die professionelle Perfektion, mit der die US-Behörden die Folgen des Doppelschlags in New York und Washington bewältigt haben, sollte nicht darüber hinwegtäuschen, dass die meisten Staaten der Erde nicht in der Lage wären, mit einer terroristisch ausgelösten Katastrophe selbst fertig zu werden. Wechselseitige Hilfe ist umso dringlicher, als die Anstrengungen, die nötig sein werden, um die Folgen eines Angriffs mit chemischen, biologischen oder gar nuklearen Kampfmitteln zu bewältigen, noch einmal ungleich höher sind.

Das Hauptinteresse sollte aber die Vorbeugung sein. Vielleicht die dramatischste Schwäche in der Terrorismusabwehr besteht darin, dass der ungehinderten Internationalisierung des terroristischen Netzwerks keine vergleichbare Veränderung auf der Seite der Dienste gegenübersteht, deren Aufgabe das Sammeln, der Austausch und die Auswertung von Informationen ist. Die Stärkung von Europol, am 21. September beschlossen, ist daher ein höchst sinnvoller Schritt.

Die Zusammenarbeit muss sich auch auf das Aufspüren und die Strafverfolgung von Terroristen ausdehnen. Ein Entwurf für eine Internationale Anti-Terrorismuskonvention liegt bereits vor. Eine weitere Konvention, die schon 1999 von der UN-Vollversammlung verabschiedet, aber nur zögerlich ratifiziert worden ist, liefert eine brauchbare Handhabe, um die Finanzierung von Terrorismus zu unterdrücken. Beide Rechtsinstrumente müssten schnellstmöglich in Kraft gesetzt werden.

Was hat sich nun weltpolitisch seit dem 11. September verändert? Dieses Datum war sicherlich keine Zeitenwende, wie manche Kommentatoren meinten, eher eine Wasserscheide. Der Megaterrorismus ist nun unbestreitbar das größte Sicherheitsproblem. Der Unilateralismus als sicherheitspolitische Strategie hat hingegen ausgedient. Die USA brauchen die Zusammenarbeit von Staaten, auch von solchen, die als potenzielle Rivalen, ja gar als Schurkenstaaten galten: Russland, China, Pakistan, vielleicht sogar Iran und Syrien.

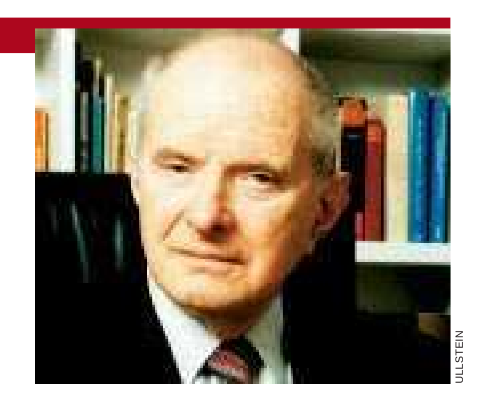
Das gemeinsame Interesse, der neuen Hauptgefahr zu wehren, einigt die großen Mächte der Welt, einigt die Staaten über regionale und kulturelle Grenzen hinweg eher als es sie trennt. Daraus ergibt sich zehn Jahre nach dem Ende des Ost-West-Konflikts eine zweite große Chance, das Versäumte nachzuholen und die Weltpolitik auf eine kooperative Basis zu stellen, in deren Zentrum der konsequente und nachhaltige Kampf gegen den Megaterrorismus steht.

Professor **Dr. Harald Müller** *ist Politologe und geschäftsführendes Vorstandsmitglied der Hessischen Stiftung Friedens- und Konfliktforschung in Frankfurt a. M.*

INTERVIEW

Die Waffe der Fanatiker

Über die Lehren aus den Terrorangriffen vom 11. September sprach Spektrum der Wissenschaft mit dem Historiker Walter Laqueur. Der Vorsitzende des International Research Council im Center for Strategic and International Studies, Washington DC, hat unter anderem das Buch „Die globale Bedrohung. Neue Gefahren des Terrorismus“ veröffentlicht.



ULLSTEIN

Spektrum der Wissenschaft: *Herr Laqueur, gibt es eine rationale Erklärung für die Ereignisse des 11. September?*

Laqueur: Natürlich. Wer aber genau hinsieht, erkennt, dass es keine einfachen Antworten gibt. Viele Beobachter nutzen in den Medien die Gelegenheit, den Angriff nur gemäß ihrer Weltanschauung auszulegen, anstatt seriös nach Ursachen zu fragen. Die Annahme etwa, die Terror-Attacke sei eine Reaktion auf Verzweiflung, Armut, Hunger und Unterdrückung, ist ein Vorurteil, das sich hartnäckig hält.

Die Tatsachen hingegen sehen anders aus. In den ärmsten Ländern der Welt gibt es kaum Terrorismus. Und Osama bin Laden, der Hauptverdächtige nicht nur der jüngsten Terroranschläge, zählt gewiss nicht zu den Ärmsten. Auch die Selbstmordpiloten sind nicht in den Slums von Kairo oder im Elend eines Flüchtlingslagers aufgewachsen. Sie stammen ausnahmslos aus der Mittelschicht Saudi-Arabiens oder anderer Länder. Sie repräsentieren eine Elite, die sich allenfalls selbst zum Anwalt der Armen aufschwingen will. Ihr Terrorismus ist nicht das Schwert der Unglücklichen – er ist die Waffe von Fanatikern.

Spektrum: *Fanatismus allein kann die Taten aber doch nicht erklären?*

Laqueur: Aber er wird gerne übersehen. Wenn Kommentatoren fragen, was wir denn nur getan haben, solchen Hass auf uns zu ziehen, verschließen sie ihre Augen vor den irrationalen Elementen solcher Taten. Ich sage keineswegs, die Terroristen seien nur Wahnsinnige. Aber zum Terrorismus gehört auch immer die Paranoia: die Annahme, in der Welt herrsche eine Verschwörung okkulter Kräfte. Linksradikale verteufeln gerne den Weltimperialismus, Rechte dagegen Juden oder Schwarze. Der Glaube an dunkle Mächte im Hintergrund motiviert die fürchterlichen Anschläge. Nicht alle Paranoiker sind Terroristen, aber bei allen Terroristen findet sich Verfolgungswahn.

Spektrum: *Welche Rolle spielt der Islam für diese Täter?*

Laqueur: Der Terrorismus, wie er durch die Attentäter vom 11. September repräsentiert wird, speist sich aus religiös-nationalistischen Impulsen – auf den hat der Islam kein Monopol. Er findet sich bei Christen, Juden, Hindus, in Japan und auch andernorts. Traurige Tatsache ist indes, dass derzeit die Gewalt als Mittel zum Zweck vor allem in moslemi-

schen Ländern oder in Staaten, in denen Moslems mit Menschen anderer Hintergründe zusammenleben, gepredigt wird. Dort sind heute fast neunzig Prozent der globalen Gewaltkonflikte beheimatet: von den Philippinen bis Somalia und Nigeria, von Kaschmir bis Palästina/Israel, Mazedonien und Algerien.

Spektrum: *Deutet das aber nicht auf eine Wurzel in ihrer Religion hin?*

Laqueur: Nicht in der Religion, sondern in den islamischen Staaten. Einst an der politischen, wirtschaftlichen und kulturellen Spitze, sind sie bedauerlicherweise zurückgefallen – nicht nur im Vergleich zum Westen, sondern auch verglichen mit dem Fernen Osten. Doch statt Selbstkritik zu üben, schieben sie die Schuld dem „großen Satan“ zu, den USA. Es gibt ganz gewiss viele andere Minderheiten und Gruppen, die berechtigteren Groll hegen als die, die am lautesten klagen, aber sie begehen keine terroristischen Angriffe.

Spektrum: *Gibt es Ihrer Meinung nach so etwas wie „gerechten Terrorismus“?*

Laqueur: Viele nationalistischen Terroristen der Gegenwart wie die Tamil Tigers oder die Mitglieder der Eta haben Beschwerden, die zumindest zum Teil berechtigt sind. Aber ihre Ziele gehen weit über jedes zu rechtfertigende Maß hinaus, und selbst wenn sie vollkommen gerechtfertigt wären, müsste man zu ihrer Verwirklichung anderen Menschen Unrecht zufügen. Alle sind sich einig, dass etwas für die Palästinenser getan werden muss, die seit dem Krieg von 1948, also seit mehr als fünfzig Jahren, in Flüchtlingslagern festgehalten werden. Aber ihre Rückkehr würde heute zu einem Bürgerkrieg führen.

Spektrum: *Welche Ziele verfolgten die Selbstmordpiloten?*

Laqueur: Sie wollten vor allem bestrafen. In ihrem Wahnsystem ist Amerika der „große Satan“, weil er ihre religiös-kulturellen Vorstellungen verletzt, indem er weibliche Soldaten auf die arabische Halbinsel geschickt hat, den Staat Israel unterstützt oder den Irak bombardiert.

Spektrum: *Droht uns bald der nächste Anschlag?*

Laqueur: Das hängt davon ab, wie und wie lange man energisch gegen die Terroristen vorgeht. Wenn die Sache nach ein paar Monaten einschläft, dann kommt es zu neuen Angriffen. Ich befürchte allerdings weniger, dass sie noch einmal ein Flugzeug als Bombe benutzen, da eine Entführung heute ungleich schwieriger ist als vor dem Attentat. Aber gemäß den Eskalationsstufen des Terrors werden sie sich bemühen, einen noch grauenhafteren Anschlag mit ▶

Massenvernichtungswaffen zu verüben. Da verfallen sie womöglich auf chemische Kampfstoffe, die leichter zu handhaben sind als Bakterien oder Viren.

***Spektrum:** Zu welchen Waffen könnten die Terroristen ihrer Meinung nach künftig greifen?*

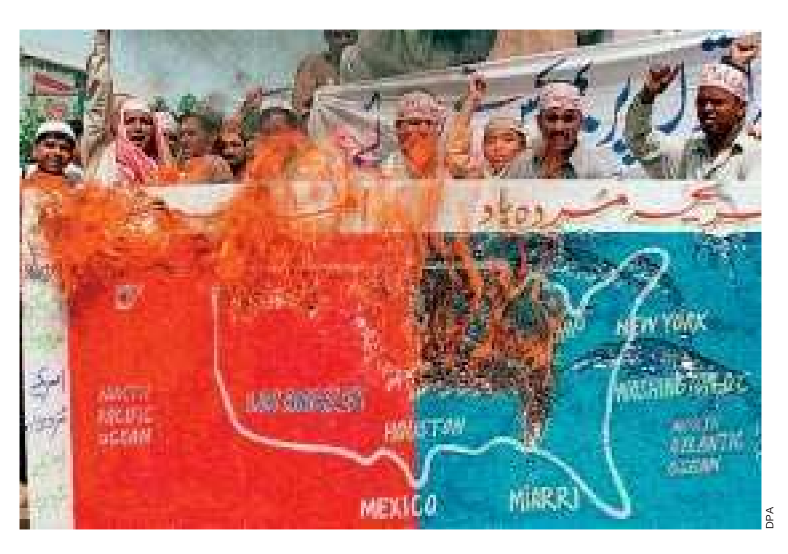
Laqueur: Viele Terrorismusexperten – auch ich – haben zweifellos unterschätzt, wie viel Schaden sich mit einfachen Mitteln anrichten lässt. Die Terroristen haben das klar erkannt. Doch in Zukunft gestaltet sich eine Flugzeugentführung oder eine Detonation mit einer Lastwagenbombe weitaus schwieriger. Deshalb auch meine Befürchtung, die Terroristen könnten auf Massenvernichtungswaffen umsteigen.

***Spektrum:** Wie werden sich Terroristen künftig organisieren?*

Laqueur: Die Anschläge in New York und Washington waren eine gut konzertierte Aktion einer vielköpfigen Terroristengruppe. Ich glaube allerdings, dass künftig eher kleine Zellen agieren werden, oder Einzeltäter vom Schlage eines „Una-Bombers“, der in den USA zwei Jahrzehnte lang Briefbomben versandte. Solche Leute lassen sich schwerer entdecken, und je weniger Mitglieder, desto stärker kann sich das Element des Wahnsinns durchsetzen – da ist alles möglich. Große Gruppen agieren in der Regel rational.

***Spektrum:** Was kann der Geheimdienst tun, um diesen Leuten beizukommen?*

Laqueur: Die Geheimdienste der Vereinigten Staaten haben eindeutig versagt. Angesichts einer so großen Gruppe, die eine ganze Attentatsserie vorbereitet hat, hätte der Geheimdienst in der Lage sein sollen, zumindest eine allgemeine Warnung abzugeben. Doch gab es weder die Ressourcen noch das Personal, um terroristische Gruppen zu infiltrieren. Zum Teil mag dies an rechtlichen Gründen liegen, die den Agenten nicht die volle Handlungsfreiheit geben, zum Teil aber auch daran, dass nicht genügend Geld vorhanden war. Für zuverlässige Informationen und das Überführen von Terroristen ist Geld nötig – doch die bereitgestellten Mittel sind minimal und stehen in keinem Verhältnis zu dem Schaden, den moderne Terroristen der Gesellschaft zufügen können.



Manche islamistische Fanatiker sehen in den USA den „großen Satan“, den es zu vernichten gilt.

DPA

***Spektrum:** Glauben Sie, dass die USA bislang politisch klug vorgegangen sind?*

Laqueur: Ich glaube, dass ein Vergeltungsschlag direkt nach der Katastrophe beträchtliche Wirkung gehabt hätte. Terrorismus basiert nicht auf gesundem Menschenverstand und elementarer Logik, genauso wenig wie effektive Gegenmaßnahmen. Die paradoxe und perverse Lehre, die aus der Geschichte des Terrorismus gezogen werden kann, ist diese: Selbst wenn man diejenigen schlägt, die nur am Rande beteiligt sind, kann man bemerkenswert vorteilhafte Auswirkungen erzielen. Die USA haben General Gaddhafi angegriffen, auch wenn der Libyer, der den weltweiten Terrorismus jahrelang unterstützt hat, mit den Bombenanschlägen, die diesen Vergeltungsschlag ausgelöst haben, unschuldig gewesen sein mag. Die USA bombardierten eine pharmazeutische Fabrik im Sudan, in der falschen Annahme, dort würde Giftgas hergestellt. Was war das Resultat dieser amerikanischen Fehler? Sowohl Libyen als auch der Sudan haben sich vom Terrorismus distanziert.

***Spektrum:** Können weitere Attentate verhindert werden?*

Laqueur: Das sollte sogar das vorrangige Ziel sein, denn damit lassen sich noch Menschenleben retten. Die Kampagne, die den USA dazu bevorsteht, könnte man mit der Trockenlegung eines Sumpfes vergleichen. Was das unter anderem bedeutet, ist klar: Der Transfer von Geldern und von Technologie an die Terroristen muss verhindert werden. Ohne staatliche Hilfe wird sich das Aktionsvermögen der Terroristen stark reduzieren. Daher ist es auch notwendig, sich mit den Staaten zu beschäftigen, die Terroristen beschützen und unterstützen. Sie sollten unter konstanter Beobachtung stehen, und man muss ihnen mit massiver Bestrafung drohen. Es liegt mehr als nur ein Körnchen Wahrheit in Ciceros „Lasst sie nur hassen, so lange wie sie sich fürchten“.

***Spektrum:** Die Regierung von Präsident George W. Bush bemüht sich um eine internationale Koalition im Kampf gegen den Terrorismus. Verhilft das zum Erfolg?*

Laqueur: Eine breite Koalition zivilisierter Staaten ist vernünftig. Doch sie kann niemals stärker sein als ihr schwächstes Glied. Manche arabische Regierungen sind zögerlich, weil sie gewalttätige Demonstrationen und Umsturzversuche in ihrem Land befürchten.



DPA

Osama bin Laden (Mitte) gilt als Drahtzieher der Terroranschläge vom 11. September in den USA.

*Die Fragen stellte **Hubertus Breuer**, Wissenschaftsjournalist in New York.*

PSYCHOTRAUMATOLOGIE

Seelische Wunden und ihre Heilung

Überlebende und Augenzeugen von Katastrophen können psychische Schäden erleiden, die sogar zu Veränderungen im Gehirn führen. Ein neuer Forschungszweig therapiert diese seelischen Verletzungen.

Von Gottfried Fischer

Als in Manhattan die lebenden Bomben in das World Trade Center einschlugen, reagierten viele Zuschauer an den Bildschirmen mit Fassungslosigkeit. Nur mühsam konnten sich manche vergegenwärtigen, dass es sich nicht um einen schlechten Film handelte, sondern um bittere Realität. Sie konnten kaum begreifen, dass das Drehbuch zu diesem Desaster nicht aus Hollywood stammte, sondern den Gehirnen ebenso rücksichtsloser wie „einfallsreicher" Terroristen entsprungen war, die in den Selbstmordattentätern willige Instrumente eben zur „Verwirklichung" ihrer Pläne gefunden hatten.

Andere fürchteten sich, im Fernsehen Nachrichtensendungen einzuschalten. Diese Leute fühlten sich zwar vom TV-Gerät angezogen, umkreisten es aber manchmal wie die sprichwörtliche Katze den heißen Brei.

Ein weiterer Teil der Zuschauer fühlte sich von den Schreckensbildern verfolgt, bis in die Träume hinein. Hilflosigkeit und bleierne Lähmung breiteten sich aus – am stärksten dort, wo Personen in ihrem unmittelbaren Nahraum betroffen waren, vor allem in Manhattan und, mit räumlicher Entfernung abnehmend, in den restlichen Stadtteilen von New York.

Posttraumatisches Belastungssyndrom

Katastrophen wie die Terrorattacke vom 11. September 2001 können bei den Überlebenden, den Augenzeugen und den Rettern schwere psychische Schäden hervorrufen. Im schlimmsten Falle wird jener Grenzwert überschritten, den die Wissenschaft als „traumatisch" bezeichnet. Seit den achtziger Jahren bemühen sich Forscher, die Kurz- und Langzeitfolgen eines daraus resultierenden „posttraumatischen Belastungssyndroms" (PTBS) zu untersuchen und immer genauer zu beschreiben.

Psychologen sprechen von einem posttraumatischen Belastungssyndrom, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

➤ ein schwer belastendes Ereignis;

➤ sich aufdrängende Nachhallerinnerungen, die bis in die Träume hineinreichen können (so genannte „flash backs");

➤ Vermeidung beziehungsweise Verleugnung von allem, was an das belastende Geschehen erinnert;

➤ schreckhafte Übererregbarkeit im Wechsel mit Abstumpfung.

Auch in der kollektiven Reaktion der Fernsehzuschauer auf den Terroranschlag in New York kommt fast das gesamte Trauma-Syndrom zum Ausdruck. Nachhallerinnerung, Verleugnung/Vermeidung sowie schreckhafte Ängstlichkeit sind hier ebenso festzustellen wie bei individuellen Patienten. Anscheinend spiegelt sich das klinische Bild in unserer kollektiven Reaktion auf erschütternde Nachrichten wider. Neben diesen Parallelen sollten wir jedoch die Unterschiede zwischen klinischem Trauma und der sozialpsychologischen Reaktion einer großen Bevölkerungsgruppe nicht übersehen. Die hartnäckig, manchmal über viele Jahre fortbestehenden Folgen traumatischer Ereignisse treten bei ungefähr einem Drittel der unmittelbar betroffenen Personen auf, glücklicherweise aber nicht bei Zuschauern vor den Fernsehschirmen.

Lange Zeit wurden Trauma-Opfer völlig unzulänglich versorgt. Wissenschaftler in den USA befassen sich seit etwa zwanzig Jahren mit diesem Problem – als Folge vor allem der Kriege in Vietnam und Kambodscha (siehe „Unsichtbare Wunden", SdW 9/2000, S. 42). Allerdings liefen die entsprechenden Untersuchungen dort längere Zeit als Beitrag zur „Stressforschung". Um jedoch die Früherkennung, Prävention und Therapie von Traumafolgen zu ermöglichen, ist eine Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen erforderlich: Psychologie, Psychiatrie, Psychoanalyse und Verhaltenstherapie sowie biologische und sozialwissenschaftliche Fächer. Sie müssen zusammenwirken, um die unsichtbaren seelischen Wunden allmählich erkennen und behandeln zu können – und zwar mit gleicher Fachkenntnis, wie dies bei sichtbaren körperlichen Verletzungen seit langem geschieht. So entstand als Gegenstück zur chirurgischen „Traumatologie", die körperliche Schäden behandelt, die „Psychotraumatologie", die seelische Wunden therapiert.

Als eine der ersten wissenschaftlich-therapeutischen Einrichtungen in Deutschland, die psychotraumatische Störungen erforschen, behandeln und Prävention betreiben, wurde 1991 das Deutsche Institut für Psychotraumatologie (DIPT) gegründet. Es befindet sich seit 1995 in Köln und arbeitet eng mit dem Institut für Klinische Psychologie und Psychotherapie der Universität zusammen. Eine 1998 gegründete Fachgesellschaft, die Deutschsprachige Gesellschaft für Psychotraumatologie (DeGPT), koordiniert die Aus- und Weiterbildung von Ärzten und Therapeuten, erarbeitet Empfehlungen und Standards für die Therapie und fördert das Wissen über die Folgen von traumatischen Lebensereignissen. ▶



Bei schweren Unfällen und Katastrophen sind Retter extremen psychischen Belastungen ausgesetzt. Oftmals brauchen sie selbst ärztliche Betreuung.

DPA



Das DIPT hat bereits viele überregionale Hilfsprojekte für Opfer von Gewaltverbrechen, Unfällen und Katastrophen durchgeführt, an denen das Ausmaß der Problematik ebenso sichtbar wurde wie die besondere Belastung der Rettungskräfte – etwa anhand des Busunglücks von Bad Dürrheim am 6. September 1992. Die Deutsche Bahn AG betraute das DIPT mit der Nachsorge für die Opfer der Bahnunglücke von Eschede (3. Juni 1998) und Brühl (6. Februar 2000). Auch die Opfer des Schwebebahnunglücks in Wuppertal (12. April 1999) und die Hinterbliebenen des Concorde-Absturzes in Paris (25. Juli 2000) wurden betreut.

Terror der Gedanken

Für Opfer von Gewaltverbrechen entwickelten wir am DIPT das „Kölner Opferhilfe Modellprojekt“. Dieses Programm umfasst Strategien zur Früherkennung sowie Maßnahmen, die Diagnostik, Begutachtung, Psychotherapie und Selbsthilfe verbessern. Im Rahmen des Beratungsprojekts „Human Protect“, in dem wir Betroffene von Überfällen in Banken und großen Unternehmen betreuen, kümmern wir uns gegenwärtig auch um die Angehörigen der Terroropfer von New York. Des Weiteren sind wir seit etwa zwei Jahren für die Bundeswehr tätig. Hier entwickeln wir ein Programm zur Früherkennung und Frühintervention nach schwer belastenden Ereignissen und integrieren es in den Routineunterricht der Streitkräfte. In all diesen Projekten kommt es entscheidend darauf an, unter den Opfern möglichst früh die Risikofälle zu erkennen – in der Regel zwischen einem Viertel und einem Drittel der Betroffenen. Denn nur dann kann die Therapie rechtzeitig einsetzen und traumatische Langzeitfolgen verhindern.

Dass jede Therapie möglichst früh einsetzen sollte, liegt an unserem Gehirn. Wir wissen heute, dass sich etwa sechs bis neun Monate nach dem traumatischen Ereignis der Informationsfluss im Gehirn dauerhaft verändern kann. Davon betroffen ist ein „Schaltkreis“ zwischen dem emotionalen Gedächtniszentrum im limbischen System und den Gehirnstrukturen im Cortex, der Hirnrinde. Hierbei übt der Hippocampus, der die räumliche und zeitliche Einordnung unserer Sinneseindrücke organisiert, eine Brückenfunktion aus. Diese Gehirnformation „degeneriert“ als Folge eines Langzeittraumas, wie wir aus neueren pathologischen Studien wissen. Vermutlich sterben dabei Zellverbände im Hippocampus in großem Umfang ab. Da nun im Gehirn der Langzeitpatienten die schrecklichen Erinnerungen anstürmen, der Hippocampus seine Funktion der räumlichen und zeitlichen Einordnung aber nicht länger auszuüben vermag, geraten die Patienten in eine furchtbare Lage: Sie durchleben das Trauma immer wieder real, ohne dass ihnen bewusst wird, dass es sich in

KOMMENTAR

Der Anschlag galt der Wissenschaft

Wie fast alle reagierte auch ich auf den verheerenden Terroranschlag vom 11. September zuerst emotional – mit Entsetzen, Mitleid und Furcht. Dann beobachtete ich, wie bei vielen das Erschrecken in politisch-militärische Vergeltungsrhetorik umschlug: Hier sei der Zivilisation, der freien Welt, ja dem Abendland der Krieg erklärt worden; nur ein „Kreuzzug“ (Bush) werde der feindlichen Hydra nacheinander alle Köpfe abschlagen können. Doch binnen weniger Tage begann eine dritte Phase der Auseinandersetzung: eine Vielfalt tastender Versuche, das Geschehene zu begreifen.

Eine Typologie dieser Versuche könnte grob zwei Gruppen von Interpretationen unterscheiden. Die eine sieht hinter dem Anschlag etwas absolut Fremdes, Feindliches, Böses, die pure Lust an der Zerstörung; es hätte wenig Sinn, hinter solchem Amoklauf etwas zu suchen, das zu verstehen wäre. Es gälte nur, sich in Zukunft mit allen Mitteln vor Wiederholungen zu schützen.

Die zweite, viel größere Gruppe von Deutungen versucht, das Geschehene als Botschaft zu lesen: Was wollten die Täter der Welt damit sagen? Der Anschlag traf Zentren von Welthandel und Militär der mächtigsten Industrienation. Einige Interpretatoren sehen darin eine politische Botschaft: eine Drohung im Namen der Armen gegen die Reichen. Demnach gelte es nun, nicht nur sicherheitstechnisch und militärisch, sondern vor allem politisch vorzubeugen. Insbesondere der Konfliktherd im Nahen Osten müsse endlich entschärft und einer Lösung näher gebracht werden. Ganz allgemein gelte es, die Schäden, die der Globalisierungsprozess lokal anrichte, abzufedern, etwa durch eine bessere Entwicklungspolitik.

So sehr man diesen Folgerungen zustimmen mag, für die ohnehin alles spricht, und so sehr man sich wünscht, dass die verbrecherische Tat wenigstens insofern doch etwas Gutes hätte, so bleibt doch auch diese Interpretation unbefriedigend. Nach allem, was bisher bekannt ist, agierten die Täter aus einem fast weltumspannenden Netzwerk, das wie eine religiös motivierte Sekte funktioniert. Nicht das von manchen unterstellte politische Anliegen motiviert deren fanatische Anhänger, sondern eher das Versprechen einer jenseitigen Belohnung für das Opfer des eigenen Lebens im Kampf gegen den Satan.

Wenn es den Attentätern um den Endkampf des Guten gegen das Böse ging, so frage ich mich, worin für sie das absolut Böse bestand und worin ihre Tat dem absolut Guten diente. Das Gute glaubten sie offenbar in einer sektiererischen Auslegung des Koran zu finden, wonach demjenigen, der im Kampf gegen das satanische Prinzip sein Leben opfert, ewige Glückseligkeit winken sollte. Aber was war für sie das absolut Böse?

Die simultane Attacke gegen World Trade Center und Pentagon missbrauchte die technische Infrastruktur der modernen Zivilisation – elektronische Kommunikation, Transport- und Verkehrsmittel – mit dem Ziel, diese technischen Lebensgrundlagen beispielhaft zu vernichten. Die Taten zielten eigentlich nicht auf Menschen. Die Opfer spielten im Kalkül der Selbstmord-Attentäter wohl eine ebenso untergeordnete Rolle wie ihr eigenes Leben. Ziel war der symbolische Weltuntergang der technischen Welt. Wenn dabei unzählige Nutznießer dieser Welt starben, umso besser. Der eigentliche Feind jedoch waren die technischen Kommunikationsknoten, von denen die moderne Welt abhängt.

Es ging nicht um konkrete politische Gegner, sondern um etwas so Abstraktes wie Gut und Böse, etwas so Jenseitiges wie Gott und Teufel, etwas so Unanschauliches wie moderne Wissenschaft und Technik.

Für diese Deutung sprechen die Auswirkungen auf die wissenschaftlich-technische Welt. Wie etwa die Magazine „Nature“ und „Science“ in ihren ersten Ausgaben nach dem Attentat berichteten, wurden internationale Kongresse abge-

UWE REICHERT

Von dem arabischen Mathematiker und Astronomen al-Khwarizmi leitet sich unser Wort Algorithmus her.

Wahrheit nur um Erinnerungsbilder handelt. Die Folge sind panische Ängste, Konzentrationsstörungen (häufig verbunden mit beruflichem Abstieg), Suchtentwicklung auf Grund von „Selbstmedikation“ sowie verschiedene psychosomatische Störungen. Damit therapeutische Maßnahmen greifen können, müssen sie einsetzen, bevor der fatale hirnphysiologische Mechanismus wirksam wird.

Zu diesem Zweck haben wir den so genannten „Kölner Risikoindex“ entwickelt, der sich mittlerweile in verschiedenen Anwendungsfeldern bewährt hat (siehe Kasten auf Seite 96). In einer vereinfachten Version läuft er im Computerprogramm „Victim“ der nordrhein-westfälischen Polizei. Nach dieser Anleitung vermögen die Beamten Risikopersonen unter den Verbrechensopfern frühzeitig zu erkennen.

Die Anfälligkeit von Gewaltopfern, an einem posttraumatischen Belastungssyndrom zu erkranken, hängt in einem gewissen Maß von ihrer Persönlichkeit und ihrem sozialen Umfeld ab. Dass gute und hilfreiche Beziehungen im Freundes- und Bekanntenkreis bis zu einem gewissen Grad vor einem Trauma schützen können, leuchtet unmittelbar ein. Weniger nahe liegende Schutzfaktoren sind höhere Schulbildung und, wie auch in neueren internationalen Studien deutlich wird, Intelligenz. Wir haben bislang keine Erklärung dafür gefunden, vermuten aber, dass Personen mit höherer Schulbildung oder Intelligenz sich besser informieren können über die ungewöhnlichen Bedingungen, mit denen uns ein Trauma konfrontiert. Das hat uns veranlasst, einem breiteren Publikum Informationen zur Selbsthilfe zugänglich zu machen.

Hierbei stellen sich zahlreiche Fragen. Soll man über die traumatisierenden Ereignisse reden? Wenn ja, mit wem? Mit wem vielleicht lieber nicht? Wie können wir wieder zur Ruhe kommen und den Gedankenterror stoppen, der uns noch quält, auch wenn die Gefahr vorüber ist? Wie kann ich erkennen, ob ein Trauma vorhanden ist – bei mir selbst oder bei Verwandten, Freunden oder Bekannten? Welche Qualifikation sollten Fachleute haben, um den Anforderungen einer Trauma-Fachtherapie gewachsen zu sein?

Hilfe zur Selbsthilfe

Für solche Fragen haben wir eine Selbsthilfe-Anleitung entwickelt, die wir in unseren überregionalen Projekten den Betroffenen an die Hand geben („Neue Wege nach dem Trauma. Erste Hilfe bei schweren seelischen Belastungen“, von G. Fischer, Vesalius-Verlag, Konstanz 2000). Unsere Begleitforschung zeigt, dass diese Broschüre als außerordentlich nützlich empfunden wird. Eine kurzfristig greifende Informationsstrategie ist nötig, da schon in den ersten Tagen und Wochen nach dem Ereignis die Weichen für den Verlauf der Erkrankung gestellt werden. (Tipps und aktuelle Hilfsangebote sind auch im Internet erhältlich unter: www.psychotraumatologie.de, Stichwort „Selbsthilfe“, und www.thieme.de/psychotrauma).

Selbsthilfe-Maßnahmen stoßen jedoch dort an Grenzen, wo eine fachtherapeutische Behandlung einsetzen muss. Der Umgang mit akut traumatisierten Personen verlangt von Psychologen, Ärzten und Psychotherapeuten ein Vorgehen, das ihnen von keiner traditionellen Richtung der Psychotherapie her vertraut ist. Zunächst müssen die intrusiven Erinnerungsbilder gestoppt und die Patienten so weit stabilisiert werden, dass sie die Kontrolle über ihr aus den Fugen geratenes Seelenleben zurückgewinnen. In der folgenden Therapiephase wird dann die traumatische Erfahrung noch einmal durchgegangen, diesmal unter Bedingungen, die eine erneute Überflutung verhindern sollen. Misslingt dies, so kann der Patient sogar erneut traumatisiert werden. Dann schädigt die Therapie statt zu helfen. In der Vergangenheit war dies sogar eher die Regel als die Ausnahme. Traditionelle Psychotherapeuten verschiedener „Schulen“ müssen deshalb nicht nur hinzu-, sondern vielfach auch umlernen.

Allgemein beruht die psychologische Traumatherapie auf zwei Prinzipien, die streng beachtet werden müssen: auf *Normalität* und *Individualität.* Ersteres lässt sich so umschreiben: „Wer Traumasymptome entwickelt, ist nicht verrückt. Er reagiert vielmehr völlig normal auf eine ver-rückte Situation.“ In der Vergangenheit wurden Traumapatienten jedoch oft „pathologisiert“. Das kann sehr leicht pas-

sagt, Flugreisen zu ausländischen Kollegen storniert, Publikationen verzögert. Die nun diskutierten Kontrollverschärfungen und Sicherheitsmaßnahmen treffen die Scientific Community in ihrem Lebensnerv. Finanzmittel, die der Forschung zugute kommen sollten, werden in militärische und Sicherheitskanäle wandern. Der freie Austausch von Ideen wird behindert, Misstrauen gefördert.

Gegen die Unanschaulichkeit und Komplexität der durch die moderne Wissenschaft geprägten Fakten und Probleme setzten die Täter die denkbar einfachste Spaltung, eine primitive Polarisierung der Welt. Ihr gigantisches Verbrechen war in der Tat das anschaulichste, das je verübt wurde: wahrlich spektakulär, ein noch nie da gewesenes Medienereignis.

In ersten Interpretationen war davon die Rede, mit dieser Untat habe eine neue Ära des Krieges begonnen – wobei freilich der Gegner unsichtbar blieb und nicht einmal durch Bekennerschreiben erklärte, wogegen er kämpft. Doch tatsächlich wäre der neue Antagonismus sogar noch viel abstrakter als einst der Kalte Krieg. Damals beriefen sich beide konkurrierenden Systeme auf ihre Modernität und Wissenschaftlichkeit, beide suchten sich durch neue Errungenschaften zu übertrumpfen. In diesem Wettlauf unterlag letztlich dasjenige System, das den freien Austausch von Ideen unterdrückte. Jetzt hingegen gibt sich ein Feind von Wissenschaft und Technik überhaupt zu erkennen; seine Schreckenstaten sollen beweisen, dass diese Modernismen Teufelswerk sind. Die Welt soll stattdessen Kampfplatz zwischen Glauben und Unglauben werden.

Doch mit dem ungläubigen Zweifel an allen bloßen Behauptungen, die angeblich in heiligen Büchern stehen, nahm die Wissenschaft ihren Anfang. Nur wenn die Welt sich die Sichtweise der Attentäter aufzwingen ließe, hätten die Täter einen Sieg errungen. Es wäre auch ein Sieg über die Wissenschaft.

Denn gewiss sind die Attentäter keine Sendboten arabisch-islamischer Kultur. Diese hat selbst große Naturforscher wie Avicenna oder Al-Biruni hervorgebracht (SdW 5/2001, S. 74); wir rechnen mit arabischen Ziffern, auch Algebra und Algorithmus stammen aus dem Arabischen. Während in Europa finsteres Mittelalter herrschte, tradierte die arabische Kultur die geistigen Schätze der Antike.

Michael Springer



sieren, da die Fachleute den Zusammenhang der Symptome mit dem furchtbaren Erlebnis oft übersehen. Auch den Betroffenen selbst bleibt der Zusammenhang verborgen, nicht zuletzt deshalb, weil sie automatisch alles vermeiden, was an den Vorfall erinnern könnte.

Gegen das zweite Prinzip, das der „Individualität", wird immer dann verstoßen, wenn die Betroffenen Standardratschläge erhalten, mit denen sie ihr Trauma angeblich bewältigen können. Hierzu gehören zum Beispiel so genannte Coping- und Bewältigungstechniken. Die Zeit unmittelbar nach einem traumatischen Ereignis ist aber denkbar ungünstig, um „Psycho-Techniken" zu erlernen, welche die Betroffenen in ihrem Leben noch niemals angewendet haben. Da ist es schon besser, sich auf das natürliche Repertoire zu besinnen und sich auf den natürlichen „Wundheilungsprozess" der Seele zu verlassen. Erfreulicherweise wirkt dieser tatsächlich, genau wie bei körperlichen Verletzungen auch. Er kann allerdings leicht gestört werden.

Ein Fortschritt der Traumatherapie besteht nun darin, dass wir gelernt haben, den natürlichen, individuellen Selbstheilungsprozess immer genauer zu erkennen und die therapeutischen Maßnahmen präzise darauf abzustimmen. Wer sich beispielsweise dadurch stabilisiert, dass er sich ablenkt, um das belastende Ereignis zu vergessen, den unterstützen wir gezielt in dieser Methode. Und wer sich bemüht, es zu verdrängen, dem helfen wir, noch effektiver zu verdrängen. Im Anschluss an diese Stabilisierungsphase kann dann das Trauma noch einmal durchgearbeitet werden.



Für viele Opfer und Helfer bis heute ein Trauma: In Eschede entgleiste am 3. Juni 1998 ein ICE und prallte gegen eine Brücke. Bilanz: 101 Tote, 80 Verletzte.

Videofilm im Kopf

Regeln für Diagnostik und therapeutischen Umgang mit der wertvollen seelischen Selbstheilungskraft haben wir in der „mehrdimensionalen psychodynamischen Traumatherapie" festgelegt. Ein Beispiel für die Stabilisierungsphase:

Die Mitarbeiterin einer Bank hatte während eines Raubüberfalls die spontane Vorstellung entwickelt, der Überfall geschehe in einem Film, aber nicht in Wirklichkeit. Dieser Selbstschutzreflex hatte ihr die bedrohliche Situation sehr erleichtert. Im Nachhinein musste sie jedoch feststellen, dass sie den Film nicht mehr abschalten konnte. Immer wenn sie an den Vorfall dachte oder darüber sprach, kehrte das Unwirklichkeitsgefühl zurück.

Wir übten nun mit der Patientin, sich die ganze Szene auf dem Bildschirm eines Fernsehers vorzustellen. Sie nahm – ebenfalls in ihrer Vorstellung – die Fernbedienung zur Hand und versuchte, die Szene abzuschalten. Dies misslang: Der maskierte Täter blieb als „Miniatur" mitten auf dem Bildschirm stehen, und zwar gerade in der für die Frau bedrohlichsten Szene, als er mit der Pistole in der Hand über die Theke in den Kassenraum sprang.

Nach den Regeln unserer Traumatherapie konnten wir sicher sein, dass die Bildschirmtechnik dem natürlichen Bewältigungsrepertoire dieser Patientin entsprach, hatte sie doch selbst spontan die bedrohliche Wirklichkeit in einen Film umgewandelt. Wir baten sie deshalb, den Versuch noch einmal zu wiederholen und mit den Knöpfen ihrer imaginären Fernbedienung weiter zu experimentieren. Schließlich funktionierte die Rückspultaste: Der maskierte Bankräuber bewegte sich rückwärts, sprang zurück vor die Theke, schließlich schloss er vor sich die Tür. Jetzt hatte die Patientin den Film in ihrem Kopf gestoppt und so die Kontrolle über die bedrohlichen Erinnerungsbilder zurückgewonnen. Doch noch mehr: Der bisher automatisch ablaufende Film war jetzt überhaupt beendet. Die Patientin war in die Wirklichkeit zurückgekehrt und konnte jetzt das ge-

---

DER KÖLNER RISIKOINDEX

Wie man Trauma-Gefährdete erkennen kann

Um frühzeitig zu erkennen, ob die Opfer eines Gewaltverbrechens akuter psychotherapeutischer Unterstützung bedürfen, können Polizeibeamte den „Kölner Risikoindex" anwenden.

Dieser Index besteht aus einer Skala mit maximal 11 Punkten. Ein Punktwert von 6,5 bezeichnet die kritische Schwelle. Die einzelnen Risikofaktoren gehen gewichtet in den Gesamtwert ein. Das Hauptgewicht kommt situativen Umständen zu. Auch zwei individuelle Einflussgrößen werden berücksichtigt. Schließlich gibt es erfreulicherweise auch Faktoren, die vor Trauma schützen können; sie verringern den Indexwert.

Situative Bedingungen sind: Schwere der Verletzungen (1 Punkt), subjektiv erlebte Lebensbedrohung (bis 2 Punkte), Schweregrad der traumatischen Situation (1 Punkt), Dauer der Bedrohung (1 Punkt, wenn über $^1/_2$ Stunde), negative Reaktion von Funktionsträgern im Nachhinein (bis 1 Punkt), negative Reaktion der sozialen Umgebung (bis 1 Punkt), Bekanntheit des Täters bei Gewaltverbrechen (1 Punkt, wenn dies zutrifft), dauerhaft belastende Lebensumstände wie etwa Arbeitslosigkeit (1 Punkt).

Individuell: So genannte „peritraumatische Dissoziation", wie Unwirklichkeitserleben („es ist ein Traum" oder „es läuft ein Film") oder Entpersönlichung („ich stand daneben und sah zu, wie alles geschah"; „ein anderer war betroffen, nicht ich"; je nach Ausprägung bis zu 3 Punkten); vorausgehende Traumatisierung in der Lebensgeschichte (bis 2 Punkte).

Schutzfaktoren: Tragfähiges soziales Netzwerk (minus 2 Punkte); höhere Schulbildung und Intelligenz (bis minus 2 Punkte)

samte Geschehen noch einmal in kleinen Schritten durcharbeiten.

Wie lässt sich ein solcher Erfolg erklären? Am ergiebigsten ist ein Ansatz, der psychologische wie auch hirnphysiologische Komponenten enthält. Ein traumatisierendes Erlebnis setzt einen Selbstschutzreflex in Gang, der hinterher oft lange weiterwirkt, obwohl er dann nicht mehr nötig wäre. Nach unserer Methodik müssen wir dieser reflektorischen Bewegung der Patienten folgen. Die Reflexhandlung wird in eine bewusste Aufgabe umgewandelt. So auch im Falle der Bankangestellten: Die Anregung, das noch einmal bewusst auszuüben, was bisher automatisch ablief, also aktiv in den Trauma-Film einzugreifen, bewirkte die entscheidende Veränderung, sogar sehr rasch. Hirnphysiologisch gesehen wurde der unterbrochene Schaltkreis zwischen limbischem System und Hirnrinde wieder hergestellt – zwischen Selbstschutzreflex und bewusster Handlungsplanung kam wieder eine Verbindung zu Stande.

DPA

Erfolgreiche Therapie

Die Methode, systematisch an die spontane Selbstheilungstendenz der Patienten anzuknüpfen, scheint sich therapeutisch zu lohnen. In einer kontrollierten Studie fand unsere Kölner Arbeitsgruppe heraus, dass im Mittel nur zehn Sitzungen genügen, um Betroffene der Trauma-Risikogruppe mit dieser Methode dauerhaft zu heilen.

Angesichts von Katastrophen wie in New York erscheint es als glücklicher Umstand, dass die Menschen wohl durchweg in der Lage sind, die für sie individuell passenden Hilfen selbst herauszufinden und gezielt zu nutzen. Diese Erfahrung haben wir jedenfalls mit unserer Selbsthilfebroschüre gemacht. Aus der Vielzahl angebotener Übungen wählen die Betroffenen meist intuitiv die für sie passenden aus. In der existenziellen Notlage eines Traumas greift der Mensch offenbar instinktiv auf Bewältigungsmethoden zurück, die ihm vertraut sind und ihm schon früher geholfen haben. So ist es möglich, einer größeren Gruppe von Betroffenen psychologische Erste Hilfe auch über eine Informationsschrift zukommen zu lassen. Ein Traumatherapeut ist ja nicht immer verfügbar. Und eine fachpsychotherapeutische Behandlung ist, erfreulicherweise, oft auch nicht erforderlich. ■

*Professor **Dr. Gottfried Fischer** leitet das Institut für Klinische Psychologie und Psychotherapie an der Universität zu Köln.*

PALÄONTOLOGIE

Günter und Brigitte Krumbiegel (Hg.)

Faszination Bernstein

Kleinod aus der Wunderkammer der Natur

Goldschneck, Weinstadt 2001. 112 Seiten, DM 39,80

Wer den stillen Reiz des Bernsteins kennt und vielleicht selbst schon Pflanzen und Tiere aus längst vergangener Zeit in ihm entdeckt hat, erliegt oft für immer seinem Zauber. Das vorliegende Buch gibt dieser Faszination angemessenen Ausdruck.

Den Schwerpunkt bildet der baltische Bernstein mit Aufsätzen von polnischen Wissenschaftlern, die sich mit seiner Entstehung, seinen Varianten sowie den in ihm eingeschlossenen Pflanzen und Tieren befassen. Die Herausgeber, die Eheleute Günter und Brigitte Krumbiegel aus Halle/Saale, berichten einführend über das weltweite Vorkommen verschiedener Bernsteine und über die „Mutterbäume“, die für die Bildung fossiler Harze in Frage kommen sollen, und geben ausführliche Hinweise auf Bernstein-Museen und -Ausstellungen in aller Welt. Das Buch schließt mit einem umfangreichen Literatur- und Stichwort-Verzeichnis.

Etwa 300 verschiedene fossile Harze sind weltweit zu finden, die ältesten aus dem Devon im Erdaltertum, die meisten jedoch aus späteren Zeiten, vor allem dem Tertiär. Aus den übersichtlichen Weltkarten in der Einleitung geht deutlich hervor, dass der tertiäre baltische Bernstein nur einer unter sehr vielen ist, was allerdings seiner Bedeutung für die Paläobiologie keinen Abbruch tut.

Die schönen, oft ganzseitigen Bilder von hervorragender Qualität lassen schon beim Durchblättern erkennen, dass interessierte Laien angesprochen sind. Seepocken sitzen auf einem Bernsteinstück und weisen damit auf dessen Aufenthalt im Meer hin; feinädrige Flügelmuster eines Schildlaus-Männchens oder schlüpfbereite, durch den Kokon schimmernde Ameisenpuppen zeichnen sich in allen Details durch das transparente Material hindurch ab. Nur der Laufkäfer auf Seite 67 verdankt sein metallisch blaues Aussehen aufnahmetechnischen Tricks, während die blauen Augen von Köcherfliegen (Seite 55) zwar etwas überzeichnet, aber im Prinzip echt sind.

Welcher Baum hat ursprünglich das Harz produziert, das im Laufe der Zeit zu Bernstein fossilisierte? Auf die Frage nach dem „Mutterbaum“ des baltischen Bernsteins gibt Barbara Kosmowka-Ceranowicz ein für Laien eher verwirrendes Resümee der Forschung. Anhand im baltischen Bernstein überlieferter Pflanzenreste wurden drei „Ökogemeinschaften“ rekonstruiert: der Nadelwald der höheren Gebirgsregionen, der Kiefer-Palmen-Eichen-Steppenwald und ein feuchter Flussauenwald mit Wasserfichten. Andererseits aber führt die Autorin heute lebende Zedern und Araukarien als Harzlieferanten an, nicht etwa, weil sie zum baltischen Bernstein beigetragen hätten, sondern weil die Infrarot-Absorptionsspektren ihrer Harze mit denen baltischer Bernsteine teils übereinstimmen. In den letzten Jahren wurde die Spektrographie als Mittel zur Identifizierung des Bernsteins allerdings erheblich in Frage gestellt. Am Ende bleibt die Suche nach dem Mutterbaum des baltischen Bernsteins ungeklärt; vielleicht hatte Hugo Wilhelm Conwentz (1855–1922), Botaniker und Gründer der deutschen Naturschutzbewegung, ja Recht, als er 1890 die Bernsteinkiefer *Pinus succinifera* vorschlug.

Die vielen Varianten des baltischen Bernsteins kommen durch unterschiedliche Entstehung des Harzes am Baum, aber mehr noch durch die Umstände der Fossilisation und der Ablagerung zu Stande. Man kann Bernsteine nach unterschiedlicher Durchsichtigkeit und äußerer Verwitterung, nach Form und Färbung differenzieren und auf viele Weisen einteilen; ob das immer hilfreich und sinnvoll ist, sei dahingestellt.

Der weitere Text über Pflanzen und Tiere des baltischen Bernsteins ist informativ, verständlich und mit übersichtlichen Tabellen versehen. Je nachdem, wie die Pflanzen und Tiere ins Harz geraten sind, unterscheidet man Klebe-, Fließ-, Tropfen- und Poolfallen. Mit der Häufigkeitsverteilung der Inklusen und der geografischen Verbreitung der baltischen Bernsteinfauna sind weitere wichtige Themen angeschnitten. Es fehlt auch nicht an Hinweisen auf „Grabgemeinschaften“ (Taphozönosen). Sie helfen die Beziehungen verschiedener Arten untereinander zu klären und nachzuprüfen, welche Tierarten sich im baltischen Bernsteinwald dieselbe Umwelt teilten.

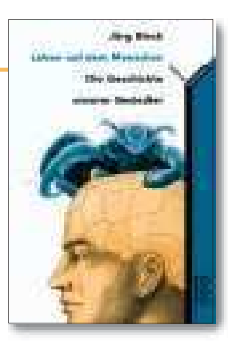
Zutreffend vermerken Verlag und Autoren auf der letzten Seite des Einbandes: „Es ist die Schönheit, die in diesem Buch im Vordergrund steht, eine Schönheit, die sich auf dem Hintergrund wissenswerter Fakten und verborgener Besonderheiten immer reicher entfaltet.“

Wilfried Wichard

Der Rezensent ist Professor am Institut für Biologie und ihre Didaktik der Universität zu Köln und befasst sich mit Evolutionsbiologie und der Paläobiologie des Bernsteins.



Der polierte Anschliff macht die Faszination dieses baltischen Bernsteins deutlich sichtbar.



Jörg Blech

Leben auf dem Menschen

Die Geschichte unserer Besiedler

Rowohlt Taschenbuch-Verlag, Reinbek 2000. 218 Seiten, DM 16,90

Der Mensch ist, ökologisch betrachtet, nichts anderes als ein ungewöhnlich artenreiches Biotop. Auf unseren äußeren und inneren Oberflächen gedeihen Hunderte verschiedener Bakterienarten – mehr als 500 sind es alleine im Mund. Hinzu kommen Viren, Pilze, Amöben und Flagellaten, die sich in den verschiedenen „Feuchtbiotopen“ von der Achselhöhle bis zu den Genitalorganen tummeln.

Wie üblich in einem Ökosystem profitieren die diversen Partner voneinander. So unterstützen Mikroorganismen uns bei der Verdauung, stellen dem Körper diverse Vitamine und Spurenelemente zur Verfügung, „trainieren“ die körpereigenen Abwehrmechanismen und bestimmen über spezifische Körperdüfte unser Sexualverhalten mit.

Für die Infektionsmedizin sind die Heerscharen körperfremder Bewohner dagegen in erster Linie Risikofaktoren, die gravierende, manchmal akut lebensbedrohliche Erkrankungen auslösen können. Und immer noch werden neue Verursacher entdeckt. Es mehren sich die Indizien, dass Mikroben auch bei so unterschiedlichen Krankheiten wie Asthma, Alzheimer oder Colitis ulcerosa die Hand im Spiel haben.

Der Biologe Jörg Blech, Wissenschaftsjournalist beim „Spiegel“, erzählt uns von „Gesundheitserregern“ und krankmachenden Mikroben, deren Gemeinsamkeit darin besteht, dass sie auf und in uns leben. Unterhaltsam und leicht lesbar wird nahezu das gesamte Spektrum altbekannter und neu entdeckter Erreger abgehandelt, die uns im Leben begleiten – von harmlosen Schmarotzern über lebenswichtige Symbionten bis hin zum gefährlichen Opportunisten.

Von *Micrococcus sedentarius*, Kugelbakterien, die den charakteristischen Schweißfußgeruch permanenter Turnschuhträger erzeugen, weiß Blech genauso gut zu berichten wie von der Dasselfliege *Dermatobia hominis*, deren Maden Ekel erregende Beulen unter sonnengebräunter Touristenhaut verursachen. Nahezu vollständig werden auch die Endo- und Ektoparasiten abgehandelt (es fehlen nur einige Exoten wie beispielsweise der Sandfloh *Tunga penetrans*), mit denen der Mensch von den Polen bis zum Äquator mehr oder minder regelmäßig zu kämpfen hat.

Angereichert mit zahlreichen Anekdoten und untermauert mit wissenschaftlichen Fakten, zeigt uns Blech in zehn Kapiteln ein System komplexer Abhängigkeiten zwischen Mensch und Mikrobe, die im Laufe der Evolution entstanden sind und auf die gängige Schablonen vom „tödlichen Feind“ oder „guten Freund“ nicht passen. Ob aus einer Besiedlung eine Infektion wird und ob sich aus einer latenten Infektion eine Krankheit entwickelt, das hängt – so zeigt Blech an zahlreichen, ungewöhnlichen Beispielen – nicht alleine von den Mikroorganismen ab. Umweltfaktoren und Merkmale des Wirts wie Immunstatus, Ernährungslage und genetische Prädisposition spielen gleichermaßen eine Rolle. Diese Erkenntnis ist zwar nicht neu (schon Louis Pasteur wird der Ausspruch zugeschrieben „Die Mikrobe ist gar nichts, das Milieu ist alles“), aber selten wurden die Zusammenhänge so unterhaltsam wie umfassend dargestellt – auch wenn der typische „Spiegel-Jargon“ auf die Dauer etwas nervt.

Bei offensichtlicher Liebe zum Detail hätte man vom Autor allerdings eine größere Genauigkeit bei den Fakten er- ▶



Mit der Flohfalle – einer durchlässigen Büchse mit einem mit Honig bestrichenen Stempel – versuchte man Anfang des 18. Jahrhunderts, sich Ungeziefer vom Hals zu schaffen.

(Seiten 100, 101 und 102: Anzeige und Beihefter)

wartet. Zahlreiche falsche Angaben zeugen von einer gewissen Schludrigkeit: Die typische Reisediarrhöe wird nicht von Shigellen verursacht, Mücken übertragen nicht die Schlafkrankheit – das macht die Tsetse-Fliege –, und gegen die Malaria werden Menschen nie immun. Wiederholungen machen die Argumentation nicht überzeugender, und bei einem Sachbuch sollten im Text benutzte Fachausdrücke oder Namen von Mikroorganismen im Index zu finden sein.

Wer sich in der großen Welt der Mikroorganismen nicht auskennt, vielleicht sogar Horror vor allen Arten von Bazillen hat oder Parasiten jedweder Größe und Form als ekelhaft empfindet, wird beim Streifzug durch „die Geschichte unserer Besiedler“ viel Neues und Interessantes entdecken. Leicht verpackt und gekonnt serviert, ist es allerdings mehr ein Buch für „zwischendurch“.

Hermann Feldmeier

Der Rezensent ist Arzt für Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie und Professor für Tropenmedizin an der Freien Universität Berlin.

GESCHICHTE

Norbert Elsner (Hg.)

Das ungelöste Welträtsel

Frida von Uslar-Gleichen und Ernst Haeckel Briefe und Tagebücher 1900–1903

Wallstein, Göttingen 2000. 3 Bände, insgesamt 1341 Seiten, DM 98,–



Der Zoologe und Naturphilosoph Ernst Haeckel (1834–1919) hat die Namen zweier geliebter Frauen in den wissenschaftlichen Namen von ihm klassifizierter Quallen verewigt. Eine Schirmqualle heißt *Desmonema Annasethe* nach seiner ersten Frau Anna Sethe und eine Scheibenqualle *Rhopilema Frida* nach seiner Geliebten Frida von Uslar-Gleichen.

Hinter dem zweiten Namen verbirgt sich eine spannende Episode der Wissenschaftsgeschichte. Um 1900 verlieben sich der umstrittene weltberühmte Forscher, der an der Universität Jena lehrt und in der Villa Medusa mit seiner zweiten Frau Agnes Huschke verheiratet lebt, und die dreißig Jahre jüngere Adelige Frida von Uslar-Gleichen (1864–1903) aus einem verarmten Geschlecht, das in der Nähe von Göttingen ansässig ist. Für Haeckel belebt Frida aufs Neue die Erinnerung an seine 1864 früh gestorbene erste Frau.

Eine verstümmelte Ausgabe des vorliegenden Briefwechsels war bereits in der Zwischenkriegszeit eine Sensation. Aus den mehr als 400 Briefen, die sich die Liebenden sendeten, versuchten die Erben des Forschers Kapital zu schlagen, indem sie einzelne Dokumente in dem Briefroman „Franziska von Altenhausen“ publizierten und so das tragische Ende dieser Beziehung publizistisch ausschlachteten. Denn Frida von Uslar-Gleichen nahm sich im Dezember 1903 mit einer Überdosis Morphium das Leben, während sich Haeckel mit seiner Ehefrau an der Riviera aufhielt.

Der Wert der intimen Schriftstücke liegt jedoch nicht in dem Skandalgeruch, sondern in den Einblicken, die er in eine konfliktreiche Debatte unter den Liebenden gewährt: Muss die menschliche Seele ein Rätsel bleiben, oder ist sie als ein Produkt der Evolution erklärbar? Daran anknüpfend bedenken sie, ob die Entwicklung ihrer Empfindungen auch einen Plan bereit hält, um die Symbiose ihrer Seelen zu fördern.

Doch die unterschiedlichen sozialen Kräfte im Leben des Forschers und der Autodidaktin stehen dagegen: Haeckel ist dem Klerus sowie dem Adel, dem Frida von Uslar-Gleichen angehörte, als „Monist“ verhasst. Der Biologe spricht nicht nur dem Menschen eine Seele zu, sondern vertritt die Auffassung, dass sogar Kristalle und Badeschwämme damit begabt seien. Er hält eine harmonische „Durchseelung“ der Evolution und eine Übereinstimmung von Goethes Naturphilosophie und Darwins Evolutionstheorie für möglich. Haeckels Eintreten für den Monismus macht ihn zu einer Art Heiligen in den Augen seiner Anhänger, die ihn sogar 1904 in Rom zum Gegen-Papst ausrufen.

Während Haeckel 1898 im Alter von 64 Jahren das Tafelwerk „Kunstformen der Natur“ und die populäre Schrift „Die Welträthsel“ vorbereitet, bittet ihn die Dame im Alter von 34 Jahren um Hilfe beim Selbststudium der Biologie und insbesondere beim Verständnis der Abstammungslehre. Haeckel schickt ihr daraufhin großzügig Bücher und anschauliche Tafeln, die er bereitwillig erklärt. Nach ersten persönlichen Treffen im Juni des darauf folgenden Jahres beginnt Frida von Uslar-Gleichen, die Korrekturbögen der „Welträthsel“ zu lesen, und macht Verbesserungsvorschläge, die auch ihr Zusammensein betreffen. Haeckel beansprucht, mit diesem Buch die Entstehung des Bewusstseins erklären zu können, und glaubt auch, dass sich seine Regungen für die Geliebte in den Bahnen der Evolutionstheorie bewegen. Er schreibt am 19. Juli 1899: „Ist es nicht seltsam, wie oft in den sechs *glücklichen* Tagen unseres Beisammenseins in Jena (noch mehr in den 4 letzten, als den 2 ersten) unsere Gedanken *gleichzeitig* sich im Denkorgan entwickelten, und gleichzeitig in derselben Form ausgesprochen wurden?“

Frida von Uslar-Gleichen prüft als verständige Leserin Haeckels Theorie des Gemüts, die er im 7. Kapitel der ▶



Zur Erinnerung an den gemeinsamen Besuch auf der Wartburg schickte Ernst Haeckel seiner Geliebten dieses Aquarell.

„Welträthsel“ formuliert, und überträgt sie auf das gemeinsame Erleben in einem Brief vom 1. Oktober 1899: „Wenn Sie behaupten, dass ‚alle die zahlreichen Äußerungen des Gefühlslebens, welche wir beim Menschen finden, auch bei den höheren Tieren vorkommen‘, so will mir das etwas rätselhaft erscheinen u. nur *sehr* bedingt anzunehmen … Die Leidenschaft, die in ‚den Ganglienzellen der Grosshirnrinde ihren Sitz hat‘ – macht mich herzlich lachen … Unsere bösen! Ganglienzellen – Was haben sie uns alles angethan! Sollten sie nicht auf operative Weise zu entfernen sein?“ Haeckels Antwort darauf ist nicht erhalten.

Während sie auf dem Gut der Familie bleibt, versucht er, durch ein ungeheures Arbeits- und Reisepensum seine Regungen für sie zu bändigen. Zunächst hat er eine gemeinsame Flucht in die Südsee in Aussicht gestellt, dann auf den baldigen Tod seiner zweiten Frau gehofft, der ihm gestattet hätte, seine Geliebte zu ehelichen; schließlich findet er sich mit der dauernden Trennung ab.

In den Briefen wird die gewaltige Lebensleistung Haeckels als Huldigung an die „Mutter Natur“ lesbar, die Disziplin und Leidenschaft fordert. Haeckel war davon überzeugt, dass sich eine wissenschaftliche Betrachtung der Natur mit einem ehrfürchtigen Empfinden und Bewahren ihrer Schönheit vereinbaren lasse. Diese Überzeugung bewunderte Frida von Uslar-Gleichen, und das vereinte auch beide in ihrem Gedankenaustausch. Unvereinbar waren hingegen die Sprache des Gefühls und der Alltag des Forschers, der in einem Netz von wissenschaftspolitischen Beziehungen gefangen war und deshalb die geliebte Frida von Uslar-Gleichen nicht aus dem Geflecht von literarischen Bezügen befreien konnte, in dem sie verzweifelt Halt in ihrem ohnmächtigen Verlangen suchte.

Anfangs lenkt sie souverän die Gefühlsausbrüche des Geliebten, der sie nach dem ersten persönlichen Treffen bestürmt. So beschwichtigt sie ihn, indem sie Goethe als sittsames Vorbild darstellt, der ebenfalls eine adelige Dame liebte, mit der er nicht vereint leben konnte. Doch die Anspruchnahme dieses und anderer literarischer Vorbilder erweist sich als tückisch. Denn sie verstärkt die ohnehin vorhandene Trennung des Alltags von der Welt der Zeichen, die beide in den Briefen gestalten und die auch die wenigen Momente ihres Zusammenseins überformt.

Ihre persönlichen Treffen wirken inszeniert. Haeckel arrangiert ihr Zusammensein nach literarischen und künstlerischen Vorbildern. Weite Passagen ihrer Briefe sind mit Zitaten aus Briefwechseln und Liebesgeschichten gestaltet. Zuweilen unterschreibt Haeckel als „Wolfgang“ von Goethe Briefe, in denen er Frida als Charlotte von Stein anspricht. Diese Stilisierungen nimmt sie auf und überbietet sie im Laufe der Monate.

Haeckel ist ein für seine Zeit sehr moderner Wissenschaftler. Er nutzt beispielsweise ausgiebig die neuen technischen Mittel wie die Eisenbahn zur Überwindung von Entfernungen oder das Mikroskop zur Überbrückung von Größenunterschieden. Aber die Diskrepanz von Gefühl und sozialer Vernunft kann er nicht überwinden; das ist unter den damaligen gesellschaftlichen Verhältnissen unmöglich.

Norbert Elsners Edition ist vorbildlich, da er die Briefe in zwei Bänden gut lesbar präsentiert und dabei wissenschaftliche und historische Bezüge herstellt. Im dritten Band publiziert er neben weiteren Dokumenten einen Anhang, der das Umfeld und den Wirkungskreis Haeckels einsichtig werden lässt. So findet sich dort eine Kritik an Haeckels Eintreten für die Euthanasie, und zwar durch Georg II., Herzog von Thüringen-Meiningen. Im kommentierten Personenregister wird auch eine ergänzende Perspektive auf die zweite Ehefrau Haeckels entwickelt. Während Haeckel sie in den Briefen stets als kränklich und nur bedingt zurechnungsfähig darstellt, erscheint sie hier als liebenswerte Mutter der gemeinsamen Kinder. Die Edition füllt auch die Lücke, die durch die längst vergriffene Biografie Haeckels von Erika Krauße entstanden ist.

Nils Röller

Der Rezensent ist promovierter Medienwissenschaftler und arbeitet am Vilém Flusser Archiv der Kunsthochschule für Medien in Köln.



KOMPLEXITÄTSTHEORIE

Mark Buchanan

Das Sandkorn, das die Erde zum Beben bringt

Dem Gesetz der Katastrophen auf der Spur oder warum die Welt einfacher ist, als wir denken

Aus dem Englischen von Carl Freytag.
Campus, Frankfurt am Main 2001. 280 Seiten, DM 39,80

Leitmotiv der ganzen Geschichte ist der Sandhaufen, auf den Körnchen für Körnchen neuer Sand fällt – computersimulierter Sand übrigens, denn der rieselt weitaus effektvoller als der echte. Mit der Zeit werden die Abhänge des Häufchens so steil, dass jeden Moment ein Erdrutsch droht – und in der Tat löst ab und zu ein einzelnes Sandkorn eine kleine oder große Lawine aus. Deren Zeitpunkt und Ausmaß sind nicht vorhersagbar; es gibt noch nicht einmal eine typische Größe. Lawinen sind einfach umso häufiger, je kleiner sie sind; diese Abhängigkeit wird durch ein Potenzgesetz beschrieben.

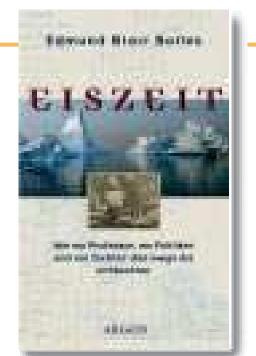
Was Per Bak und Kan Chen in dieser Zeitschrift (März 1991, S. 62) als „selbstorganisierte Kritizität“ beschrieben haben, findet sich in vielen anderen Systemen. Das Paradebeispiel für Ereignisse, die jedes für sich überraschend und in ihrer Häufigkeit nach einem Potenzgesetz verteilt auftreten, sind Erdbeben; aber das Erklärungsmuster passt auf viele andere Phänomene: das Umklappen der Elementarmagnete in einem Eisenkristall nahe der kritischen (Curie-)Temperatur, Börsenkräche, Kriege und wissenschaftliche Umwälzungen.

Wie kann es sein, dass so verschiedenartige Phänomene auf so einheitliche Weise korrekt beschrieben werden können, und das, ohne dass der Beschreiber sich überhaupt eingehend mit der Physik des einzelnen Phänomens beschäftigt? Wie ist es mit dem freien Willen des Einzelnen vereinbar, dass das kollektive Verhalten vieler Aktienhändler von einem Potenzgesetz beherrscht wird?

Die Antworten auf solche Fragen sind, wie die Fragen selbst, erst wenige Jahre alt und teilweise noch ziemlich spekulativ. Umso mehr Respekt gebührt dem britischen Wissenschaftsjournalisten Mark Buchanan dafür, dass er dieses noch sehr unruhige und dementsprechend spannende Wissenschaftsgebiet so geordnet und in klarer, natürlicher Sprache dargestellt hat.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



GEOWISSENSCHAFTEN

Edmund Blair Bolles

Eiszeit

Wie ein Professor, ein Politiker und ein Dichter das ewige Eis entdeckten

Aus dem Amerikanischen von Astrid Becker.
Argon, Berlin 2000. 258 Seiten, DM 36,–

Wo ich jetzt gerade schreibe, in einem Vorort von Hamburg, war vor rund 15000 Jahren nichts als Eis. Bei früheren Vorstößen reichten mächtige Gletscherfronten bis dorthin, wo heute Amsterdam, Düsseldorf und Dresden liegen. Auf dem Höhepunkt der Eiszeit lagen über dreißig Prozent aller Landflächen auf der Erde unter einem bis zu dreieinhalb Kilometer dicken Eispanzer begraben – heute sind es etwa zehn Prozent, hauptsächlich auf Grönland und dem antarktischen Kontinent.

An geologischen Maßstäben gemessen, spielte das Drama des großen Eises in der jüngsten Vergangenheit der Erde. Entsprechend frisch sind noch seine Spuren. Dennoch taten sich die Forscher schwer damit, sie zu deuten. Der mühselige Weg zu einer Erkenntnis, die vielen Zeitgenossen lange Zeit völlig unannehmbar erschien, ist das Thema des New Yorker Journalisten Edmund Blair Bolles.

Der Autor beschreibt die Irrungen und Wirrungen, bis das große Eis schließlich als Jahrhundert-Entdeckung anerkannt wurde. Viele trugen dazu bei, im Miteinander wie im Gegeneinander. Wer den Wissenschaftsbetrieb kennt, hat hinreichend Anlass zum Schmunzeln.

Den Geologen ging es jedoch nicht nur um die üblichen Meinungsverschiedenheiten in Details, sondern um die Grundlagen ihres noch jungen Faches. Erste Bestandsaufnahmen der unterschiedlichen Landschaftsformen, der Gesteine und der darin enthaltenen Fossilien lagen bereits vor. Welche Schlüsse waren daraus über die Entwicklung der Erde zu ziehen? Anhänger einer Katastrophentheorie sahen, gestützt auf die Schöpfungsgeschichte der Bibel, die Auswirkungen einer Serie gewaltiger Ereignisse, durch die unser Planet in nur wenigen tausend Jahren entstanden sein sollte. Vertreter des Aktualismus hingegen akzeptierten nur geologische Prozesse, wie sie auch in der Gegenwart zu beobachten sind, und rechneten mit viel längeren Zeiträumen.

Drei Figuren stellt Bolles in seinem Buch besonders heraus: den schottischen Geologen Charles Lyell (1797–1875), einen der Begründer des Aktualismus, seinen Schweizer Kollegen Louis Agassiz (1807–1873) und den amerikanischen Polarforscher Elisha Kent Kane (1820–1857).

Wer hat nur den Untertitel auf dem Gewissen, an dem fast nichts stimmt? Weder war Lyell ein Politiker, nur weil er Anhänger seiner Lehre um sich scharte, noch Kane ein Dichter, weil er einen Expeditionsbericht anschaulich abzufassen verstand. Und das Eis der Eiszeit war eben nicht ewig, sonst hätte man sich um die Spuren der Vergangenheit nicht so lange mühen müssen. Der erste Eindruck, der Schlimmes befürchten lässt, täuscht glücklicherweise – das Buch ist ordentlich recherchiert und differenziert geschrieben.

Wie waren die „Findlinge“, jene großen, eigentlich ortsfremden Felsblöcke, von ihren Ursprungsorten über viele Kilometer hinweg an die Fundstellen gelangt? Eine Sintflut heute unbekannten Ausmaßes, so glaubten Naturforscher seit Ende des 18. Jahrhunderts, musste sie dorthin verfrachtet haben. Doch Findlinge weisen keinerlei Anzeichen dafür auf, dass sie vom Wasser weit übers Land gerollt worden sind.



Anfang der 1830er Jahre kam Lyell der Lösung etwas näher: Eisberge, die in einem urzeitlichen Meer schwammen, hätten die Findlinge herangetragen und beim Abschmelzen abgesetzt.

Widerspruch kam bald darauf aus der Schweiz. Zwei Außenseiter, der Bauingenieur Ignatz Venetz und der Salzminen-Direktor Jean de Charpentier, waren bereits durch Studien an Moränen, also an Gesteinsschutt, den Gletscher vor sich hergeschoben oder seitlich angehäuft hatten, zu dem Schluss gekommen, dass das Eis einstmals viel weiter gereicht haben muss als in der Gegenwart. Der als Experte für fossile Fische geschätzte Agassiz nahm sich 1836 in Neuchâtel des Problems an. Er begründete die Gletscherforschung und sammelte zahlreiche neue Belege für eine immense Ausdehnung des Eises in früherer Zeit.

1837 zog Agassiz zusammen mit dem Münchener Botaniker Karl Schimper den Schluss, dass es in der Vergangenheit eine enorme Kälteperiode gegeben haben muss. Die Theorie stieß freilich auf einhellige Ablehnung. Lyell, der sonst so Fortschrittliche, sah in einer unversehens über die Erde gekommenen Eiszeit eine der Katastrophen, gegen die er sich sein Leben lang vehement gewandt hatte, und schwenkte erst 1857 um.

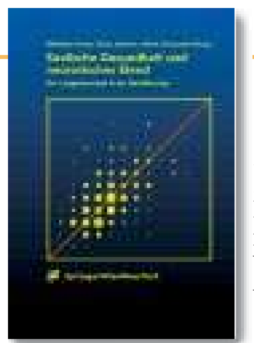
Der Dritte in Bolles' Bund, Elisha Kent Kane, unternahm 1853 bis 1855 eine zweieinhalbjährige Schiffsexpedition nach Nordwestgrönland. Im Jahr darauf veröffentlichte er einen mit Stichen illustrierten Bericht, der den Geologen erstmals einen lebhaften Eindruck davon vermittelte, welche Eismassen die heute gemäßigte Zone damals bedeckt haben mussten.

Bolles hat die Geschichte der Eiszeit-Entdeckung mit dem Verlauf von Kanes Expedition eng verflochten. Dadurch konfrontiert er den Leser auf der Spur des vergangenen Eises immer wieder mit real existierendem Eis. Da die Expedition ins Polareis jedoch zwei Jahrzehnte später stattfand als die Spurensuche in der Schweiz, ist die Verzahnung der unterschiedlichen Zeiträume etwas gewöhnungsbedürftig. Ein wirklich gravierender Mangel ist, dass der an Fakten und Namen reiche Bericht kein Register hat.

Aber unbestreitbar ist dem Autor ein Text gelungen, dessen Lektüre auch Uneingeweihten die oft wie selbstverständlich erwähnte und doch schwer vorstellbare Eiszeit anschaulicher machen kann.

Erwin Lausch

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Wissenschaftsjournalist mit Schwerpunkt Geologie in Ahrensburg.



PSYCHIATRIE

Matthias Franz, Klaus Lieberz und Heinz Schepank (Hg.)

Seelische Gesundheit und neurotisches Elend

Der Langzeitverlauf in der Bevölkerung

Unter Mitarbeit von Steffen Häfner, Gerhard Reister und Wolfgang Tress.
Springer, Wien 2000. 200 Seiten, DM 78,–

Das vorliegende Buch stellt die Ergebnisse eines weltweit wohl einzigartigen Projektes dar. Sechshundert Mannheimer Frauen und Männer der Jahrgänge 1935, 1945 und 1955 wurden nach dem Zufallsprinzip ausgewählt und über mehr als 15 Jahre mittels Tests und zahlreichen tiefenpsychologischen Interviews über Gesundheit und Krankheit, ihre Biografie, ihre Beziehungen und ihre privaten und beruflichen Lebenssituationen befragt. Ein großer Stab von Forschern und wissenschaftlichen Hilfskräften erstellte das Konzept der Studie, erhob die Daten und übernahm die Auswertungsarbeit.

Die Fragestellung des Mannheimer Kohortenprojektes war: Wie häufig sind psychogene Erkrankungen? Wie verlaufen sie spontan, das heißt ohne Behandlung? Was beeinflusst Entstehung und weiteren Verlauf? Unter einer psychogenen Erkrankung verstehen die Autoren eine Psychoneurose, eine psychosomatische Erkrankung, eine Persönlichkeitsstörung, eine Verhaltensstörung oder eine Sucht, also auch Erkrankungen, die sich im Wesentlichen in körperlichen Symptomen äußern. Personen, die unter schweren psychischen Erkrankungen wie etwa Schizophrenie litten, blieben für diese Studie außer Betracht.

Als wichtigste Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:

An einem beliebigen Stichtag ist mehr als ein Viertel der erwachsenen deutschen Großstadtbevölkerung von einer psychogenen Erkrankung in nennenswertem Ausmaß betroffen. Umgekehrt bedeutet dies: Die weitaus meisten Leute sind zu einem Stichtagstermin weitgehend frei von krankheitswertigen Symptomen psychischer Ursache. Insgesamt bleibt etwa knapp die Hälfte der Menschen im Erwachsenenalter von ernsthaften psychogenen Erkrankungen verschont – von kurzen Episoden einmal abgesehen.

Spontane Besserungen psychogener Erkrankungen ohne therapeutische Intervention sind – entgegen einem weit verbreiteten Vorurteil – nur bei einem kleinen Prozentsatz der Betroffenen festzustellen.

Sämtliche untersuchten klinischen Variablen zeigen eine klare Schichtabhängigkeit: Mit sinkendem Sozialstatus nimmt die Beeinträchtigung durch psychogene Erkrankungen zu. Frauen der unteren sozialen Schichten haben ein besonders hohes Chronifizierungsrisiko. Je größer die psychogene Beeinträchtigung, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für einen sozialen Abstieg.

Bemerkenswert sind die Verlaufsunterschiede in Bezug zum Familienstand: Die von Anbeginn hochgradig psychisch Kranken waren zu einem größeren Teil geschieden oder unverheiratet geblieben. Im Langzeitverlauf korrelieren Scheidung und Ledigenstatus hoch mit psychischer Erkrankung.

Erworbene Defizite fördern fatale Kreisprozesse

Uneheliche Geburt, ein großer Altersunterschied zwischen den Eltern, Abwesenheit der Mutter sowie psychische Erkrankungen von Vater und/oder Mutter sind Faktoren, die eine psychogene Erkrankung begünstigen. Kindheitserfahrungen einschließlich der schulischen Förderung beeinflussen die Ausbildung kommunikativer und kognitiver Prozesse. Hier erworbene Defizite gehen in die weitere Lebensgestaltung ein und werden Teile eines Kreisprozesses, in dem Persönlichkeitsdefizite, mangelhafte Lebensbewältigung und verfehlte Lebensentscheidungen einander auf ungünstige Weise befördern. So wird verständlich, dass viele psychisch Kranke belastende Lebensereignisse häufig selbst mit herbeiführen.

Dagegen sind eine stabil zur Verfügung stehende, warmherzige Bezugsperson, eine seelisch gesunde Mutter und eine unneurotische Beziehung der Erziehungspersonen untereinander Kindheitsfaktoren mit schützender Wirkung. Auf ihrer Basis entwickeln sich spezielle Persönlichkeitszüge, die man Kompetenz und Flexibilität nennen könnte (das Fachwort ist „resilience") und die sowohl Alltagsprobleme als auch biografische Extrembelastungen zu bewältigen helfen.

Ein dichtes soziales Netzwerk mit als befriedigend empfundener sozialer Unterstützung (Nachbarschaft, Arbeitsplatz) hat bedeutende vorbeugende Wirkungen.

In einer Zeit, in der rasche und „neue" Forschungsergebnisse angestrebt werden, muss man dem Mannheimer Kohortenprojekt seine Hochachtung aussprechen. Unbestreitbar hat die Studie auch wichtige Ergebnisse erbracht.

Und doch erscheint mir angesichts der für Psychotherapieforschung hohen Summe von etwa 2 Millionen DM so genannter Drittmittel das Ergebnis erstaunlich mager. Deutlich werden zwei grundsätzliche Probleme: Zum einen sind die Ergebnisse solcher Untersuchungen zwangsläufig in hohem Maße durch die Vorannahmen und Erwartungen der Wissenschaftler geprägt.

So haben die Autoren dieser Studie das Augenmerk vorrangig auf die Defizite der von ihnen Untersuchten gelegt und weniger auf die Haltung und Einstellung der Therapeuten. Sie plädieren zwar sehr deutlich für Maßnahmen, um die allgemeine Scheu vor der Inanspruchnahme eines Psychotherapeuten abzubauen, sprechen aber kaum darüber, dass dafür auch die Therapeuten einige Grundeinstellungen revidieren müssten.

Zum anderen werden an dieser Studie die Grenzen des im Prinzip konventionellen Forschungsdesigns deutlich, was den Autoren auch durchaus bewusst ist. Es geht um Verläufe mit prozesshaftem Charakter. Die Komplexität des Geschehens kann mit im Prinzip reduktionistischen Methoden nur unzureichend erfasst werden.

Störend empfand ich die häufig wenig würdigende Sprache, mit der über die Klienten geredet wird; auch erscheinen manche Interpretationen weit weniger durch die Daten als durch die therapeutische Ausrichtung der Autoren gesteuert.

Diese kritischen Einwände können jedoch insgesamt den Wert des Projektes nicht entscheidend schmälern. Im Gegenteil: Angesichts der vielen Millionen Forschungsgelder für die Pharmaforschung wäre es höchst wünschenswert und außerordentlich notwendig, wenn mehr Forschungsprojekte über psychische Erkrankungen und ihre psychotherapeutische Behandlung entsprechend großzügig angelegt und auch finanziert würden.

Wilhelm Rotthaus

Der Rezensent ist ärztlicher Leiter des Fachbereichs Psychiatrie und Psychotherapie des Kinder- und Jugendalters der Rheinischen Kliniken Viersen.

Virtuelle Universität im Selbstversuch

Das Thema „Neue Medien“ bietet den Universitäten in einer für sie schwierigen Zeit öffentlicher Angriffe und allgemeiner Legitimationsprobleme ein erfreulich unverfängliches Feld für öffentlichkeitswirksame Aktivitäten. Projekte im Bereich der „Multimedialen Lehre“ stellen die bestehenden Strukturen nicht in Frage, erfreuen sich häufig finanzieller Unterstützung des Staats und könnten sich schließlich sogar selbst finanzieren – so jedenfalls die Hoffnung. Die Initiatoren der Projekte unterstellen, eine theoretisch unbegrenzte Zahl von Bildungswilligen könne auf Internetseiten zugreifen, die ihrerseits nur ein einziges Mal entworfen und dann lediglich aktualisiert werden müssten. Marktpotenziale sehen sie nicht nur in der Hochschulbildung selbst, sondern auch in der Weiterbildung, lagern doch derzeit viele Großunternehmen ihre betriebliche Weiterbildung aus und suchen neue Bildungsträger.

So versuchen viele Hochschulen, ihr Image und ihr Angebot durch multimediale Lehre zu verbessern. Zahlreiche Präsenzuniversitäten, aber auch Fernuniversitäten, Fernfachhochschulen sowie private Fernstudienanbieter konkurrieren auf dem neu entstehenden Markt. Hinweise finden Sie unter: http:/www.studieren-im-netz.de/fmg.htm, http://www.virtuelle-hochschule.de, http://winfoline.de, http://www.fernuni-hagen.de oder http://www.big-internet.de.

Aus didaktischer Sicht könnte die Nutzung neuer Medien für die Studierenden echte Vorteile bieten: Computersimulationen physikalischer oder biologischer Prozesse bringen den Studierenden einen Sachverhalt näher als das echte Experiment auf dem fernen Hörsaaltisch in der Massenvorlesung; die Lernenden selbst können in den Prozess eingreifen und dadurch Erfahrungen ganz neuer Qualität gewinnen. Tempo und Richtung der Lernwege sind am eigenen PC selbstständiger steuerbar als in festgefügten Lehrveranstaltungen. Nicht zuletzt können die Studierenden Zeit und Ort ihrer Lernaktivitäten selbst bestimmen.

Die Praxis dagegen ist weithin enttäuschend. Sehr häufig beschränkt sich der multimediale Auftritt auf die Darstellung von (Hyper-)Texten oder Powerpoint-Präsentationen, allenfalls ergänzt durch Chatrunden oder weiterführende Links ins Netz. Online-Angebote sind technisch häufig instabil und pädagogisch problematisch. Realistische Erfolgschancen der Produkte auf dem Weiterbildungsmarkt sind nicht in Sicht.

Die Gründe für das offensichtliche Defizit liegen, so glaube ich, in der Struktur universitärer Lehre. Denn:

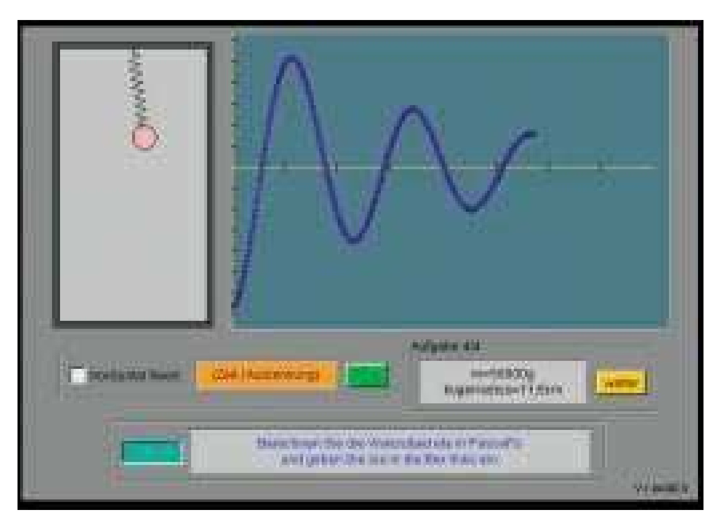
➤ Investitionen in Form von Zeit und Geld müssen sich für die „Kunden“ auch lohnen. Das heißt: Studienangebote müssen vermarktbare Qualifikationen vermitteln, um selbst vermarktbar zu sein. Multimedial erworbene Studienleistungen sind zur Zeit jedoch nur selten den herkömmlichen gleichgestellt.

➤ Weder inhaltlich noch methodisch ergibt sich eine Orientierung an der (marktrelevanten) Praxis bruchlos aus dem Lehrangebot der Hochschulen. Eine solche Orientierung wird schon sehr lange gefordert und wäre unter Umständen sogar wünschenswert. Sie scheitert jedoch bislang regelmäßig an den Autonomieansprüchen eines Wissenschaftssystems, das sich (aus guten Gründen) seine inhaltlichen Maßstäbe selbst setzt.

➤ Die Vorstellung, die Nachfrager würden massenhaft und quasi von alleine auf die Lehrangebote im Netz zugreifen, mit ihrer Hilfe lernen und für sie bezahlen, wird in der Realität nicht eingelöst. Fernlehre muss in aller Regel systematisch beworben und verwaltet, kontinuierlich begleitet und durch Präsenzveranstaltungen ergänzt werden. Dieser Aufwand ist in den meisten Fällen mindestens ebenso hoch wie bei der Präsenzlehre.

➤ Sowohl die inhaltliche und didaktische Gestaltung der Lehrangebote als auch die kontinuierliche Betreuung der Lernenden sind zeit- und kostenintensive Aufgaben, die keineswegs nebenbei oder als Abfallprodukt akademischer Lehre zu erledigen sind. Bislang wird die Entwicklung multimedialer Lehrangebote nur allzu häufig an Studierende und Angehörige des akademischen Mittelbaus delegiert. Diese können zwar eher als die Hochschullehrer mit der nach wie vor sehr komplexen Software für Autoren umgehen, sind aber methodisch wie didaktisch häufig ziemlich unbeleckt. Die Interessenlage dieser beiden Gruppen verhindert tendenziell eine ernsthafte Auseinandersetzung mit den praktischen Problemen der jeweils anderen: Der sehr erhebliche Aufwand würde – in Geld, Status oder Berufschancen – nicht honoriert.

Demnach sollten die Hochschulen Lehre und Weiterbildung per Internet in eigenständigen Institutionen mit entsprechend qualifizierten und entlohnten Mitarbeitern durchführen. Damit aber würden sie ihren zentralen Wettbewerbsvorteil aufs Spiel setzen: die privat und staatlich subventioniert nutzbare Arbeitszeit von Studierenden und Angehörigen des Mittelbaus.



Der „Früheinstieg ins Physikstudium“ (http://fips-server.physik.uni-kl.de/fips/) richtet sich insbesondere an Wehr- und Zivildienstleistende. Das Internet-Angebot der Universität Kaiserslautern bietet virtuelle Experimente wie dieses mit einer gedämpften Schwingung und soll im Verbund mit Präsenzveranstaltungen eine klassische Anfängervorlesung in Physik ersetzen.

Langfristig wird die Vermarktung multimedialer Angebote der Hochschullehre jedoch wohl nur erfolgreich sein, wenn die Produkte marktgängigen Qualitätsstandards entsprechen – und das wird nicht allen Hochschulen gelingen. Heute jedenfalls sind die meisten verfügbaren Angebote davon noch weit entfernt.

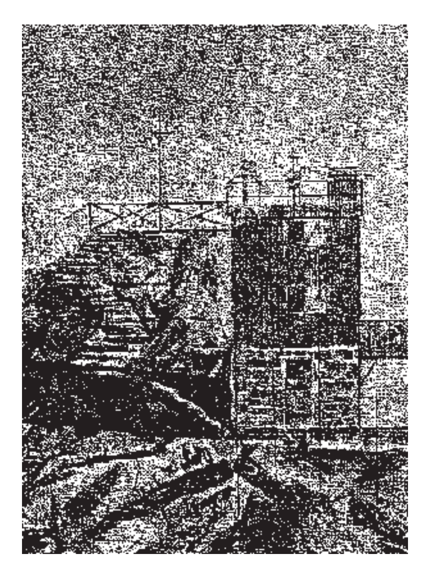
Ute Clement

Die Autorin ist wissenschaftliche Assistentin am Institut für Berufspädagogik der Universität Karlsruhe. Einer ihrer Arbeitsschwerpunkte ist die Evaluation multimedialer Lehre im Hochschulwesen.



Meteorologischer Thurm auf der Zugspitze

Besondere Sorgfalt wurde natürlich der Verankerung des Turmes zugewendet, da derselbe nur in seinem unteren, als Vorratsraum dienenden Geschosse, gemauert ist. Die zwei oberen Stockwerke, Wohnraum und Instrumentenraum, sind in Fachwerk ausgeführt. Jede Seite hat 4 Anker von 3 cm Durchmesser erhalten, die im Mauerwerk durch Querstangen gehalten, aber auch noch im anstehenden Fels 1,50 m tief eingelassen sind. ... Ausserdem ist der Turm und auch das Haus noch durch Spannseile niedergehalten. Der Transport des gesamten Materiales auf die Spitze erfolgte durch Träger. Besonderes Interesse bietet der Blitzableiter, für dessen Notwendigkeit die Blitzschläge am Zugspitzkreuz eine nicht misszuverstehende Sprache redeten. *(Bayerisches Industrie- und Gewerbeblatt, No. 47, 1901, S. 374)*



Neuer Wetterthurm auf der Zugspitze verankert

Chemische Eigenschaften der Radiumstrahlen

Berthelot hat mit einer von Curie erhaltenen Probe Radium, die einige hunderttausendmal stärkere Strahlen aussendet als das Uran, Versuche angestellt. ... Er umgab das Gläschen, welches Radiumstrahlen aussendet mit Jodsäure, die unter zehntägigem Einfluss der Strahlen in Jod und Sauerstoff zerlegt wurde. ... Auf Bleigläser üben Radiumstrahlen eine doppelte Wirkung: aus den Bleiverbindungen wird metallisches Blei abgeschieden, dadurch schwärzen sich die Gläser, Mangan aber wird oxydiert, dadurch werden sie bläulich. *(Die Umschau, V. Jg., No. 48, 1901, S. 957)*

Tycho Brahes Leichnam exhumiert

Jeder Zweifel wurde gehoben als man in der Stirnbeingegend eine oberflächlich vernarbte Knochenwunde fand, die augenscheinlich durch jenen unglücklichen Hieb beim Duelle erzeugt worden ist, durch den Tycho Brahe eines Teiles seiner Nase beraubt wurde. Die Umgebung jener Knochenwunde ist hellgrünlich gefärbt; das wird am einfachsten dadurch erklärt, dass dem grossen Astronomen die künstliche Nase, welche derselbe zu Lebzeiten zur Deckung seines Nasendefektes trug, auch mit ins Grab gegeben wurde; sie bestand wohl aus einer kupferhaltigen Legierung, deren Farbe der natürlichen Hautfarbe möglichst nahe kam und weniger Nachfärbung bedurfte. *(Die Umschau, No. 45, V. Jg., 1901, S. 896)*



Künstliche Muskelfaser arbeitet

Teru Hayashi von der Columbia-Universität in New York erzeugte dadurch eine zur Arbeitsleistung befähigte „künstliche“ Muskelfaser, daß er zunächst aus fein zerkleinertem Kaninchenmuskel Actomyosin extrahierte, aus diesem Extrakt ein dünnes Häutchen auf Wasser herstellte und dieses dann zu einem dünnen Strang preßte. Legte der Forscher nun diese Mus-kelfaser in eine Lösung von ATP und belastete sie zugleich mit dem Hundertfachen ihres Eigengewichtes, so verkürzte sie sich innerhalb von 15 Minuten um etwa 20 Prozent. Sie vermochte also Arbeit zu leisten. *(Orion, 6. Jg., Nr. 22, 1951, S. 920)*

Nobelpreise für Chemie und Physik verliehen

Die Schwedische Akademie der Wissenschaften verlieh den Nobelpreis für Chemie zu gleichen Teilen dem amerikanischen Physiker Edwin Mattison McMillan und dem gleichfalls amerikanischen Chemiker Glenn Theodore Seaborg für ihre Arbeiten über die Transurane. So gelang McMillan 1940 die Entdeckung des Elements 93, das von ihm die Bezeichnung Neptunium erhielt. In Fortführung der Arbeiten gelang Seaborg die erste Darstellung eines „synthetischen“, also eines künstlichen Elementes mit der Ordnungszahl 94, des Plutoniums. ... Der Nobelpreis für Physik wurde ebenfalls zwei Atomforschern zu gleichen Teilen zugesprochen: dem Briten John Douglas Cockroft und dem Iren Ernest Thomas Fintan Walton. ... Beiden gelang gemeinsam der Nachweis, daß durch die künstliche Spaltung von Lithium-Atomkernen wertvolle wissenschaftliche Erkenntnisse für weitere Fortschritte auf dem Gebiete der Atomzertrümmerung gewonnen werden können. *(Chemiker-Zeitung, 75. Jg, Nr. 33, 1951, S. 622)*

Experimentelle Druckmaschine für „Xeroprinting“

Bei dieser Abart der Xerographie wird keine lichtempfindliche Isolatorschicht auf Metallunterlage benutzt, sondern auf photomechanischem Wege wird das zu druckende Bild in Form einer dünnen isolierenden Schicht unmittelbar auf eine Metallplatte gebracht. Diese Platte kann dann als Druckplatte in einer Rotationsmaschine verwendet werden. In einem periodisch sich wiederholenden Prozeß wird die Platte während der Umdrehung elektrisch aufgeladen, mit Pulver bestreut und „entwickelt“ und auf die Papierbahn gedrückt. *(Umschau, 51. Jg., Heft 22, 1951, S. 687)*



Das gefaltete Blatt

von Pierre Tougne

Bei einem rechteckigen Blatt Papier (Rückseite rosa) wurde eine Ecke genau auf den Mittelpunkt einer Seite der Länge 84 Zentimeter gefaltet. Die Länge des entstandenen Falzes beträgt 87,5 Zentimeter.

Wie lang ist die andere Rechteckseite?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Spiele „Trememo“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. November 2001, eingehen.

Lösung zu „Drei mal drei“ (September 2001)

Für die Rätselaufgabe gibt es einfache Lösungen:

$(3-3)\times 3 = 0$	$3! - 3 : 3 = 5$
$(3+3) : 3! = 1$	$3 \times 3 - 3 = 6$
$(3+3) : 3 = 2$	$3! + 3 : 3 = 7$
$3+3-3 = 3$	$3+3+3 = 9$
$3 : 3 + 3 = 4$	$3,\bar{3} \times 3 = 10$

Der Querstrich ist ein Periodenstrich: $3,\bar{3} = 3,333\dots$

Friedrich Wilhelm Schierwater aus Heidelberg wunderte sich wie viele andere, warum die 8 nicht gefragt war. Schließlich gibt es hierfür auch eine einfache Lösung:

$$8 = 3! + 3! : 3$$

Martin Bernhauer aus Karlsruhe wusste das Wurzelzeichen einzusetzen:

$$\sqrt{33+3} = 6$$

Willy Bruechle aus Weiterstadt erhielt mit Hilfe einer Kubikwurzel die Lösung

$$\sqrt[3]{3/3} = 1$$

Unter den „üblichen Rechenzeichen“ der Aufgabenstellung kann man allerlei verstehen; schließlich ist unter den Mathematikern eine Vielzahl von Zeichen üblich. Darunter ist auch die so genannte Gauß-Klammer für das Runden nach unten auf ganze Zahlen: $[x]$, gelegentlich auch $\lfloor x \rfloor$, steht für die größte ganze Zahl, die kleiner oder gleich x ist. Damit gelang W. Lübke aus Barenburg eine unkonventionelle Darstellung der Zahl 7:

$$[\sqrt{3}] + 3 + 3 = 7$$

Christoph Enzinger aus Wien verwendete die Signumfunktion $\mathrm{sign}(x)$, die positive Zahlen auf 1, negative auf –1 und 0 auf 0 abbildet :

$$3 + 3 - \mathrm{sign}(3) = 5$$

Zweifellos ist auch die Fibonacci-Folge f_n, rekursiv definiert durch $f_0 = 1$, $f_1 = 1$ und $f_{n+2} = f_n + f_{n+1}$ für alle $n \geq 0$, allgemein gebräuchlich. Akzeptiert man das f der Fibonacci-Folge als „Rechenzeichen“, so ist auch die Darstellung durch Michael Hammer-Kruse aus Kiel

$$f_{3+3} : f_3 = 4$$

eine (etwas ausgefallene) Lösung. Übrigens lassen sich alle Zahlen von 0 bis 10 mit Hilfe der Fibonacci-Folge darstellen.

Insbesondere die schwereren Zahlen wie die 10 gaben zu besonders kreativen Lösungen Anlass. Adolf Rühm aus Neusäß benutzte die trigonometrische Umkehrfunktion Arcustangens und das Gradmaß:

$$\arctan(\sqrt{3}) : (3+3)^\circ = 10$$

Oliver Fischer aus Nürnberg erledigte das Problem durch Uminterpretieren. Im Zahlensystem mit der Basis 12 gilt

$$3 \times 3 + 3 = 10 \quad (= 12 \text{ dezimal})$$

Michael Uhl aus Bickenbach bemerkte, dass das Prozentzeichen auch nur ein Kürzel für „Hundertstel“ ist:

$$\sqrt{\sqrt{3 \times 3}/(3\%)} = 10$$

Roman Rucker aus Dornhan formulierte die nicht verlangte 8 über den Logarithmus zur Basis 2 (ld wie Logarithmus dualis) und die Gauß-Klammer und schaffte es dabei, die drei Dreien unmittelbar hintereinander zu schreiben:

$$[\,\mathrm{ld}(333)] = 8$$

Norbert Hülsbusch aus Duisburg gelang es sogar, jede beliebige positive ganze Zahl n mit nur einer Drei darzustellen:

$$n = -\mathrm{ld}\left(\mathrm{ld}\left(\sqrt{\sqrt{\dots\sqrt{[\sqrt{3!}]}}}\right)\right)$$

mit n ineinander verschachtelten Wurzelzeichen (die Wurzel in der Gauß-Klammer nicht mitgezählt). Es ist nämlich $[\sqrt{3!}] = [\sqrt{6}] = [2,449\dots] = 2$, und der obige Ausdruck ist deshalb

$$= -\mathrm{ld}\left(\mathrm{ld}\left(\sqrt{\dots\sqrt{2}}\right)\right)$$

$$= -\mathrm{ld}\left(\mathrm{ld}\left(2^{\frac{1}{2^n}}\right)\right) = -\mathrm{ld}\left(\frac{1}{2^n}\right)$$

$$= -\mathrm{ld}(2^{-n}) = -(-n) = n$$

Für negative Zahlen lässt man einfach das führende Minuszeichen weg. Eine beliebige rationale Zahl erhält man unter Investition von zwei Dreien als Quotienten zweier derartiger Ausdrücke.

Die Gewinner der sechs Spiele „Fossil“ sind Sonja Westermayer, Gundelfingen; H. R. Gnägi, Zürich; Jürgen Hamann, Berlin; Irma Wirth, Paderborn; Willy Bruechle, Weiterstadt; und Kerstin Schefold, Berlin.

Lust auf noch mehr Rätsel? Auf der Website von Spektrum der Wissenschaft (www.spektrum.de) finden Sie jeden Monat in der Rubrik „Rätsel“ eine neue mathematische Knobelei.

Ungewöhnliche Kachelungen

Aus einer einfachen Konstruktionsanweisung entstehen höchst komplizierte, nicht-periodische Muster.

Von Ian Stewart

Parkettierungen sind seit jeher ein beliebtes Thema der Unterhaltungsmathematik. Es geht darum, mit einer oder mehreren vorgegebenen Formen – den Kacheln – die unendliche Ebene, oder wenigstens einen hinreichend großen Teil davon, lückenlos und nicht-überlappend auszulegen. Ich hatte im Januar 2000 die Ehre, Ihnen in dieser Rubrik einige künstlerische Parkettierungen zu präsentieren. Vor kurzem wies mich Michel Châtelain aus Prilly (Schweiz) auf eine ganz andere Parkettierungsmethode hin, bei der sich die Form der Kacheln erst ziemlich gegen Ende ergibt. Zuerst wird das Schema festgelegt, nach dem die Kacheln aneinander gelegt werden sollen, und erst dann eine Form, die dazu passt.

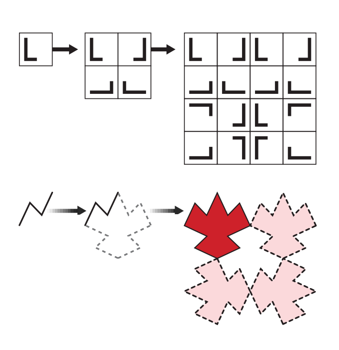
Denken Sie sich zum Beispiel ein einzelnes Quadrat. Natürlich kann man die Ebene einfach mit Quadraten auslegen, wie bei einer Badezimmerwand, aber wir wollen noch einen gewissen Dreh mit einbauen. Das Bild unten zeigt, wie man aus einem Quadrat viere macht, die zusammen ein größeres ergeben; dabei habe ich die Quadrate mit L-förmigen Zeichen versehen, um sichtbar zu machen, wie sie gedreht und/oder gespiegelt werden. Wenn wir die gleichen vier Transformationen mit dem 2×2-Quadrat wiederholen, erhalten wir den im Bild gezeigten Block aus 16 Quadraten.

Man kann diesen Prozess nun beliebig wiederholen und erhält immer größere Blöcke aus 64 Quadraten, 256 und so weiter. Jeder Block ist im nachfolgenden enthalten; deshalb passt die ganze Folge von Parkettierungen in ein einziges unendliches Muster. Je nach Vorgehensweise kann man so die ganze Ebene oder einen unendlich großen Teilbereich parkettieren. Wenn man, wie im Bild beschrieben, jedes Teilmuster der Folge in die linke obere Ecke seines Nachfolgers legt, parkettiert man einen unendlichen Quadranten – ein Viertel der ganzen Ebene. Wenn man abwechselnd links oben und rechts unten anlegt, wird die ganze Ebene überdeckt. Eine Halbebene lässt sich füllen, indem man beispielsweise zwischen links unten und rechts unten abwechselt.

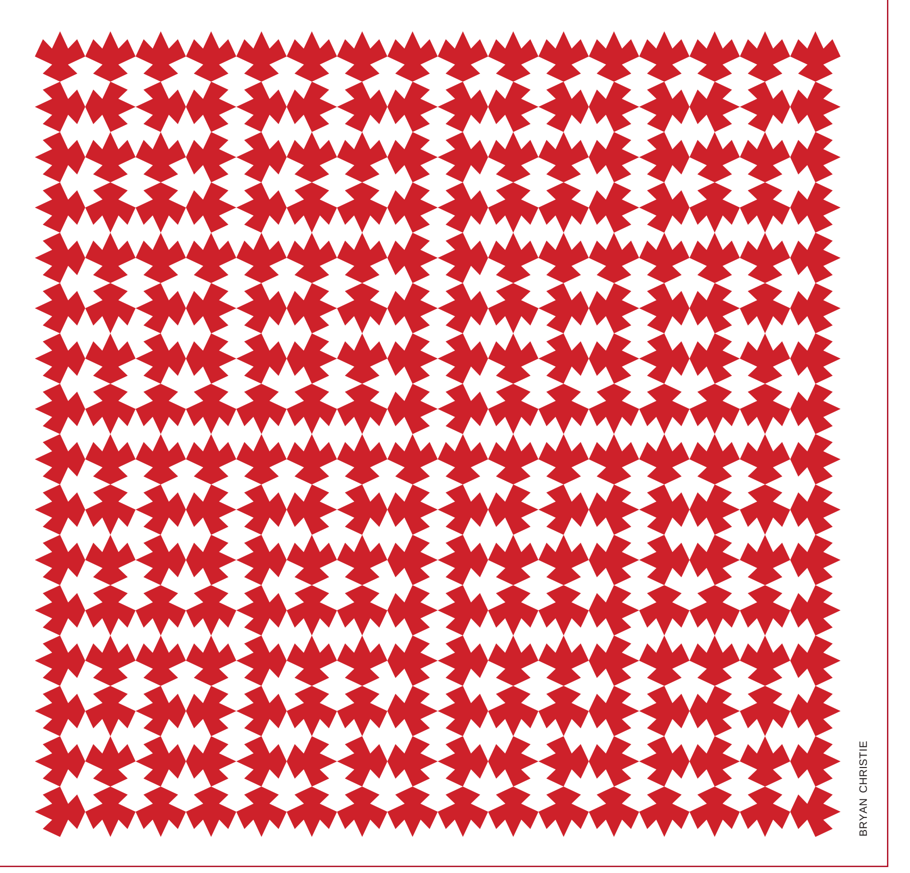
Inflation: Schneeballprinzip für Parkette

Das ganze Verfahren ist ein Spezialfall des so genannten Inflationsverfahrens. Die Parkettierungstheoretiker verwenden die Inflation gerne, um zu zeigen, dass ein gewisses Muster keinesfalls periodisch sein kann. Damit liefert es ein ergiebiges Modell für die Festkörper, die als „Quasikristalle“ zu Ruhm gelangten.

Aber die Quadrate mit den L-förmigen Markierungen sind nicht die Kacheln, auf die es uns ankommt. Sie sollen



Aus einem Quadrat entstehen viere nach folgender Vorschrift: Das linke obere Quadrat des Viererblocks ist eine unveränderte Kopie des Ausgangsquadrats, das rechte obere ist um eine vertikale Achse gespiegelt, das linke untere um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn gedreht und das rechte untere zuerst gedreht und dann gespiegelt. Aus dem 2×2-Block wird durch Anwendung derselben Vorschrift ein 4×4-Block und so weiter. Wendet man die Vorschrift auf eine N-förmige Zickzacklinie an, so ergibt sich eine Kachel, die nach derselben Vorschrift ausgelegt werden kann (rechts).



BRYAN CHRISTIE

nur als Platzhalter für die zu konstruierenden Kacheln die Transformationen anzeigen, welche die endgültige Parkettierung erzeugen. Unsere Kachel entsteht aus einer erzeugenden Kurve. Das ist eine ziemlich beliebig geformte Linie, die von der linken unteren Ecke des Ausgangsquadrates zu dessen oberer rechten Ecke verläuft. (Diese Bedingung stellt sicher, dass die Kachelform geschlossen ist.) Die im Bild links unten gezeigte Kurve ist eine N-förmige Zickzacklinie.

Nun unterwerfen wir diese erzeugende Kurve den gleichen vier Transformationen wie zuvor die Quadrate. Und siehe da: Die Kurve selbst plus ihre gedrehten und gespiegelten Bilder ergeben zusammen eine geschlossene Form, die an einen Vogel erinnert oder an einen Menschen mit Umhang und ausgebreiteten Armen, wie Batman im Landeanflug. Auf diese Kachel kann man nun dieselben Transformationen anwenden wie auf das Ausgangsquadrat, und das immer wieder. Im Ergebnis erhalten wir eine Parkettierung der Ebene, oder eines Teils davon, mit unendlich vielen Exemplaren dieser interessanten Kachel.

Die Bilder rechts zeigen weitere Parkettierungen, die mit dieser Methode erzeugt wurden. Verwendet man die N-förmige erzeugende Kurve, aber andere Transformationen, so erhält man eine neue Kachelform und eine neue Anordnung (*A*). Ändert man die Form der Kurve, so erhält man andere Kacheln, die aber auf dieselbe Art zusammenpassen (*B*). Es kann auch vorkommen, dass mehr als eine Kachelform entsteht (*C*).

A B C D

BRYAN CHRISTIE

Durch Variation der Anfangsbedingungen entstehen zahlreiche Muster nach demselben Prinzip. Wenn man auf die N-förmige erzeugende Kurve ein anderes Sortiment von Transformationen anwendet, erhält man eine andere Kachel und ein anderes Muster (*A*). Dieselben Transformationen auf eine variierte Kurve angewandt ergeben eine weitere Kachel, aber die gleiche Anordnung der Kacheln (*B*). Manchmal entsteht dabei mehr als eine Kachelsorte (*C*). Ein Sortiment von Transformationen (Drehungen) für vier gleichseitige Teildreiecke eines gleichseitigen Dreiecks (*D*), angewandt auf die erzeugende Kurve, ergibt drei Sorten Kacheln, die zu einem Dreiecksmuster zusammenpassen.

Nicht-periodisch in jeder Größenskala

Die so entstehenden Muster sind übrigens in aller Regel aperiodisch, also nicht einfache Verschiebungen (Translationen) einer Grundform wie bei einer gewöhnlichen Tapete. Periodische Muster sind ein einfacher Spezialfall dieser Konstruktionsanleitung: Wählen Sie alle Transformationen als Translationen (also keine Drehungen und keine Spiegelungen), oder, was auf dasselbe hinausläuft, zeichnen Sie einfach vier Quadrate, deren L-Markierungen alle die gleiche Orientierung haben. Jede Parkettierung, die aus diesen Transformationen hervorgeht, ist periodisch.

Die Ausgangsform muss nicht unbedingt ein Quadrat sein. Zulässig ist jede Form, die in mehrere verkleinerte Exemplare ihrer selbst zerlegbar ist; diese Formen haben den Spitznamen „Rep-Tile" (von *repetitive tile*, „Wiederholungskachel") erhalten (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 112). Ein gleichseitiges Dreieck ist ein Rep-Tile, denn vier kongruente gleichseitige Dreiecke lassen sich zu einem größeren zusammensetzen. Damit kann man bemerkenswerte Muster erzeugen (Bild *D*). Vielleicht können Sie ähnliche Parkettierungen finden. Bisher hat niemand alle überhaupt möglichen Rep-Tiles bestimmt; es gibt also noch Raum für neue Entdeckungen.

Die gleiche Methode funktioniert in drei Dimensionen. Beispielsweise passen acht Würfel zu einem Würfel der doppelten Kantenlänge zusammen. Der Würfel ist also ein „Replieder". (Diese Bezeichnung habe ich soeben erfunden. Leider ist sie nicht so schön doppelsinnig wie Rep-Tile.)

Man kann die Komponenten eines Rep-Tiles ebenso wie die Ausgangsform in verkleinerte Exemplare ihrer selbst zerlegen, diese abermals und so weiter. Dann ist man bei der Selbstähnlichkeit – ein Teil gleicht einer verkleinerten Kopie des Ganzen –, die ihrerseits typische Eigenschaft eines Fraktals ist (Spektrum der Wissenschaft 7/2000, S. 72). In der Tat beruht das Parkettierungsverfahren von Châtelain auf Methoden, mit denen man Fraktale konstruiert. Es ist ein schönes Beispiel für das, was Fraktale auszeichnet: Mit einer einfachen Konstruktionsanleitung lassen sich wundervoll komplexe Muster erzeugen. ■

Ian Stewart *ist Professor für Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).*

Die Grippe-Impfung

Alljährlich sterben allein in Deutschland bis zu 7000 Menschen an den Folgen einer Grippe-Infektion, weltweit geht die Zahl möglicherweise in die Millionen, und besonders schwere Infektionswellen forderten ungleich mehr Opfer.

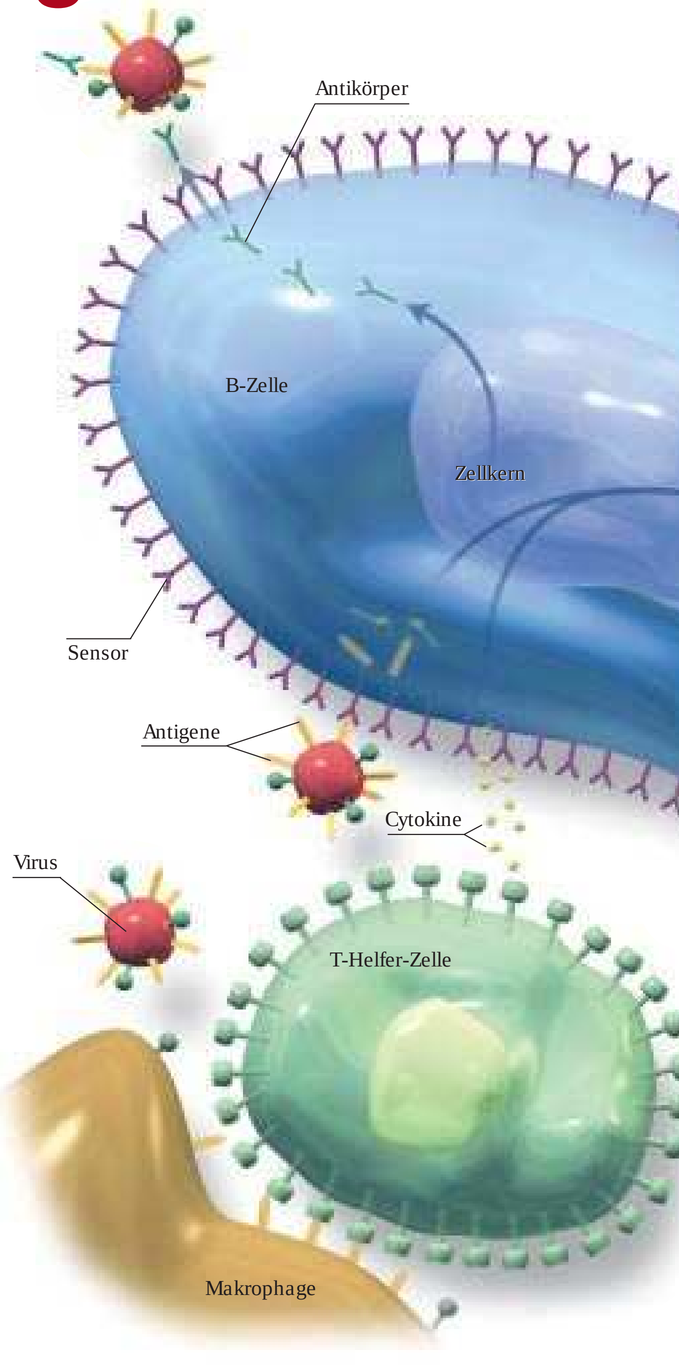
Das Virus verbreitet sich über Sekrettröpfchen, die vom Befallenen ausgehustet oder -geniest und dann von anderen mit der Atmung aufgenommen werden. Es dringt in Zellen ein und vermehrt sich dort. Eine Woche oder länger benötigt das Immunsystem, um die Infektion zu bekämpfen. Dieser Kampf schwächt den Erkrankten, und mitunter kommen Komplikationen wie eine Lungenentzündung hinzu.

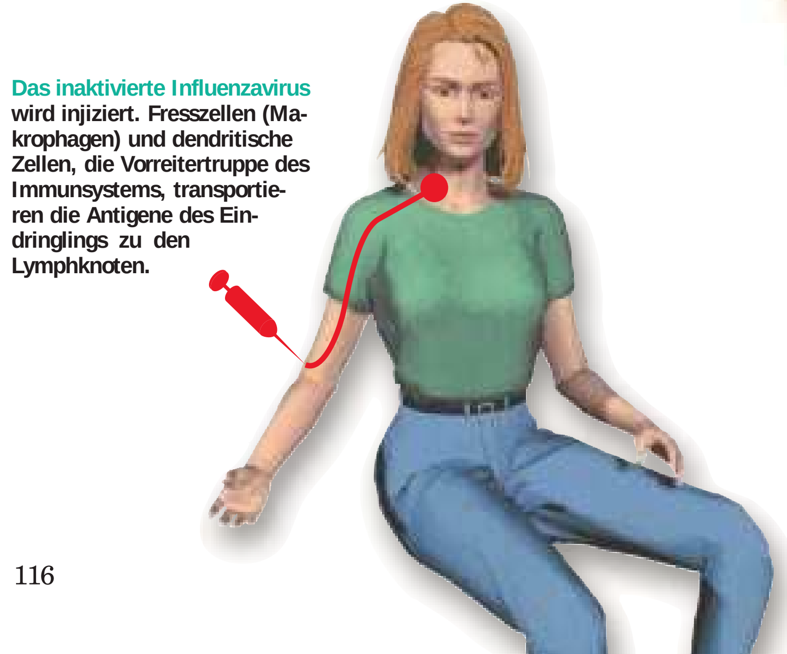
Um der Gefahr vorzubeugen, empfehlen Ärzte eine Schutzimpfung. Sie trainiert das Immunsystem, den Gegenangriff bei Bedarf schnell zu starten und so eine Infektion rasch in den Griff zu bekommen. Weil das Virus aber ständig mutiert, muss jedes Jahr ein neuer Impfstoff entwickelt werden. Die Saison beginnt auf der Nordhalbkugel normalerweise im November und erreicht ihren Höhepunkt im Februar. Anhand der sich ausbreitenden Stämme empfiehlt die Weltgesundheitsorganisation (WHO) jeweils drei Influenzastämme für den „Impfstoff-Cocktail“ des kommenden Jahres. Bis spätestens Februar stellt die Organisation jedes Jahr pharmazeutischen Firmen die entsprechenden Impfstämme zur Verfügung.

Die Viren werden in befruchtete Hühnereier injiziert, wo sie sich vermehren. Jeder Virus-Stamm wird separat gezüchtet und mit dem Eiklar entnommen, gereinigt und inaktiviert. Danach mischt man die Stämme mit einer Trägerflüssigkeit und füllt sie in Glasampullen. Diese Produktion ist weitestgehend bis August abgeschlossen, und der Versand zu den Gesundheitsorganisationen spätestens im Oktober beendet.

Der Grippe-Impfstoff ist in gesunden Erwachsenen nur zu 70 bis 90 Prozent wirksam und noch etwas schlechter bei anderen Personengruppen. Zudem hält der Schutz nur ein halbes bis ein Jahr lang an. ■

Der Autor ***Mark Fischetti*** *ist Redakteur bei Scientific American.*

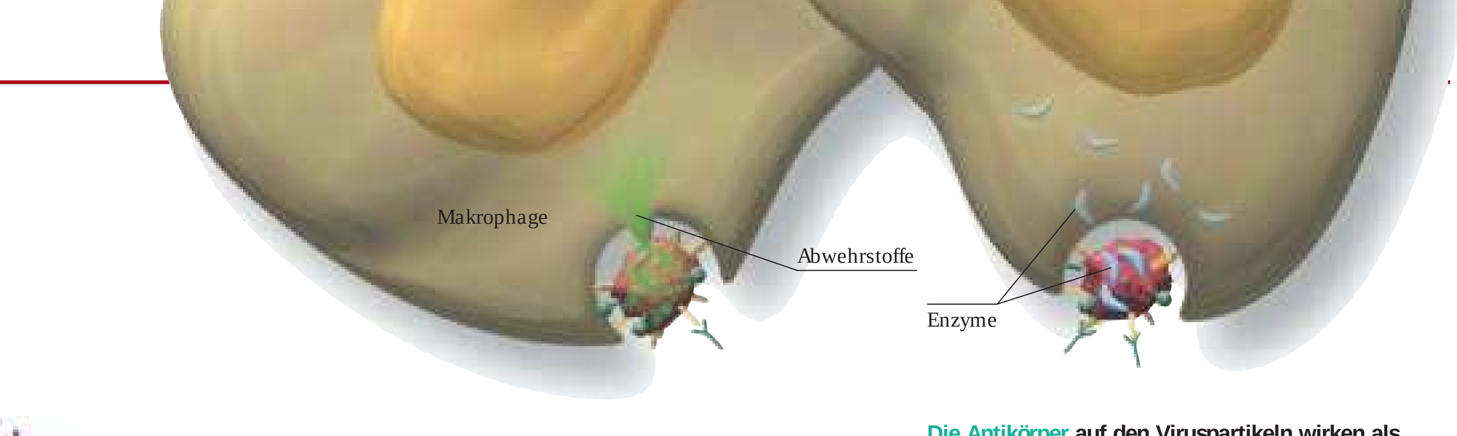




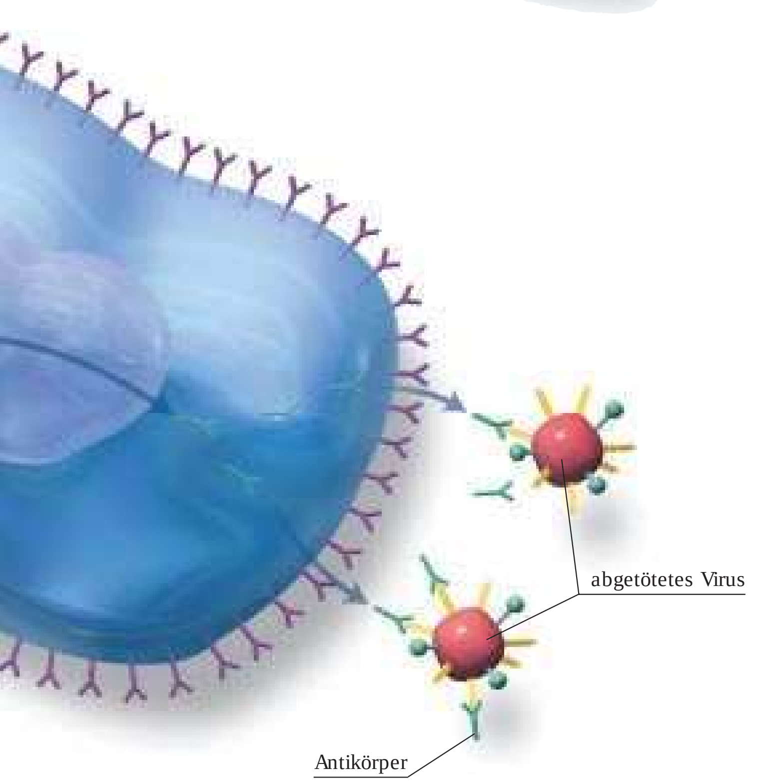
Das inaktivierte Influenzavirus wird injiziert. Fresszellen (Makrophagen) und dendritische Zellen, die Vorreitertruppe des Immunsystems, transportieren die Antigene des Eindringlings zu den Lymphknoten.

In den Lymphknoten erkennen B-Lymphocyten mit passendem Sensor die Antigene auf der Virushülle, wie es auch bei einer echten Grippe-Infektion der Fall wäre (oben). Unterdessen heften sich T-Helfer-Lymphocyten an Influenza-Antigene (Mitte), die von Makrophagen präsentiert werden (unten). Sie geben daraufhin Cytokine genannte Signalmoleküle ab, mit deren Hilfe die aktivierten B-Zellen Gene in ihrem Zellkern anschalten, um Antikörper zu produzieren. Diese docken an die jeweiligen Antigene des Virus an und würden bei einem noch lebenden Erreger eine Infektion weiterer Zellen abblocken.

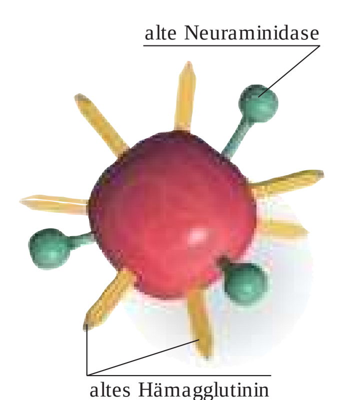
GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE

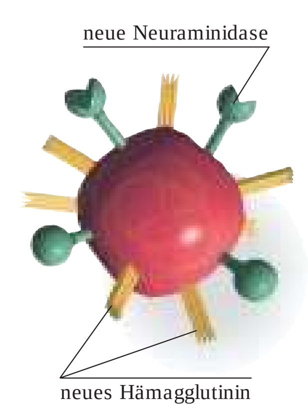


Die Antikörper auf den Viruspartikeln wirken als Signal für Fresszellen. Ein solcher Makrophage schließt den Fremdling ein und produziert Giftstoffe, um ihn abzutöten, oder Enzyme, um ihn zu verdauen. Das inaktivierte Virus hat seinen Zweck erfüllt, die trainierten B- und T-Zellen werden bei einer eventuellen echten Infektion schnell reagieren und gemeinsam die weitere Antikörperproduktion ankurbeln.



Das Influenza-Virus verändert ständig seine als Antigene erkennbaren Oberflächenmoleküle Hämagglutinin (HA) und Neuraminidase (NA). Folglich können trainierte B- und T-Zellen die nächste Generation schlechter erkennen. Meist geschieht das durch kleinere Mutationen in der viralen Erbsubstanz (Ribonucleinsäure, RNS) nur allmählich. Solche „Antigendrift“ lässt sich durch das Design der Impfstoffe abfangen. Gelegentlich jedoch tauschen unterschiedliche Viren genetisches Material aus. Dieser „Antigenshift“ ändert die RNA auf einen Schlag drastisch und macht eine völlig neue Impfstoffzusammensetzung erforderlich.





Wussten Sie schon?

➤ Die Influenza ist in Deutschland pro Jahr für bis zu 28 000 Krankenhauseinweisungen verantwortlich und kostet etwa 890 Millionen Mark für die medizinische Versorgung.

➤ Extreme genetische Veränderungen des Erregers können globale Pandemien zur Folge haben: An der „Spanischen Grippe“ starben 1918/19 weltweit zwischen 20 und 40 Millionen Menschen. Die „Asiatische Grippe“ (1957) und die „Hongkong-Grippe“ (1968) forderten zusammen weltweit mehr als 1,5 Millionen Opfer (1968/69 gab es allein in der Bundesrepublik Deutschland 30 000 Todesfälle).

➤ Die Biotechnologie-Firma Aviron in Mountain View (Kalifornien) hat klinische Phase-III-Studien eines abgeschwächten Lebendvirusimpfstoffes abgeschlossen, der in die Nase gesprüht wird und auf diesem Weg leichter und schmerzfreier als per Spritze zu verabreichen wäre.

➤ Laut einem Bericht der amerikanischen Arzneimittelbehörde (FDA) kann die tägliche Einnahme von Tamiflu (einem Medikament, das Influenzasymptome bei Erwachsenen mildert) den Ausbruch der Krankheit fast ebenso verhindern wie eine Impfung. Dennoch bleibt die Organisation bei ihrer Empfehlung zur Impfung.

Lebensfeindliches Weltall

Gibt es außer der Erde noch andere Planeten mit höheren Lebensformen? Sehr unwahrscheinlich, behaupten Astronomen heute. Denn die „ökologischen Nischen“ in unserer Galaxis sind weitaus seltener und kleiner als vermutet.

Boxenstopp im Zwergenland

Für manche ist MicroCar nur ein winziges Automobil, für andere der größte Feldversuch in Sachen Mikrofertigung.





Gifttod im Meer

Die meisten tropischen Fische in amerikanischen und europäischen Salzwasseraquarien wurden beim Fang mit Cyanid betäubt. Diese Praxis bedroht mittlerweile einzigartige Korallenriffe.

Weitere Themen im Dezember

Neue Krebsmedikamente

Maßgeschneiderte Wirkstoffe sollen gezielt Stoffwechselwege möglichst nur in Krebszellen stören.

Himmlische Störenfriede

Hubschrauber sind unentbehrliche Arbeitstiere in der Luftfahrt, aber sie machen teuflischen Lärm. Weltweit packen Physiker und Ingenieure nun das Übel an der Wurzel.



Hypnose

Oft belächelt oder mystisch verklärt erobert sich die Hypnose einen festen Platz unter den therapeutischen Verfahren etwa zur Schmerzbekämpfung.

